



# UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

*La Universidad Católica de Loja*

## ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

**Sistema de adquisición de datos de sensores remotos usando un  
Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV).**

TRABAJO DE TITULACIÓN

**AUTORES:** Riofrío Poma, Alexis Paúl.  
Torres Vicente, Ronnier Alexander.

**DIRECTOR:** Quiñones Cuenca, Manuel Fernando, Ing.

LOJA – ECUADOR

2016



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

Septiembre, 2016

## APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ingeniero.

Manuel Fernando Quiñones Cuenca.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: “*Sistema de adquisición de datos de sensores remotos usando un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV)*”, realizado por los profesionales en formación: *Riofrío Poma, Alexis Paúl y Torres Vicente, Ronnier Alexander*; ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, mayo de 2016

f. ....

*Ing. Manuel Fernando Quiñones Cuenca.*

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, *Alexis Paúl Riofrío Poma* y *Ronnier Alexander Torres Vicente* declaramos ser Autor.es del presente trabajo de titulación: Sistema de adquisición de datos de sensores remotos usando un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV), de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo el Ing. Manuel Fernando Quiñones Cuenca director del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad

Adicionalmente declaramos conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f. ....

Autor.: *Alexis Paúl Riofrío Poma*

C.I.: 110565196-0

f. ....

Autor.: *Ronnier Alexander Torres Vicente*

C.I.: 172156822-6

## DEDICATORIA

Con mucho cariño  
a mi familia y profesores  
les dedico este trabajo.

Alexis Paúl Riofrío Poma.

A mi familia  
con mucho amor y cariño  
le dedico todo mi esfuerzo  
y trabajo puesto para  
la realización de esta tesis.

Ronnier Alexander Torres Vicente.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres, Raúl y Elena quienes con sabiduría sutil supieron fundamentar a mi persona desde lo moral hasta lo espiritual. A mis hermanos Sandra, Raúl, Ivanova y Bryan seres que influyeron en lo que soy y persigo. Nunca pedí consejo, ayuda o afecto pues creí no necesitarlo. A todos los anteriores les dedico este trabajo pues en tácita presencia los supieron brindar.

Alexis Paúl Riofrío Poma.

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme cuidado todos estos años de formación profesional y haberme permitido el haber llegado hasta este momento tan importante para mí. A mis padres por ser el pilar más importante, por demostrarme su cariño y apoyo incondicional. A mis hermanos y compañeros porque siempre estaban dispuestos a escuchar y ayudarme en cualquier momento.

Ronnier Alexander Torres Vicente.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLA .....	XIII
RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
ACRÓNIMOS .....	5
CAPÍTULO I .....	6
<b>1 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>7</b>
1.1.1 Objetivo general. ....	7
1.1.2 Objetivos específicos.....	7
<b>1.2 Justificación .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 Metodología .....</b>	<b>9</b>
CAPÍTULO II .....	11
<b>2 ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Redes de Sensores Inalámbricas.....</b>	<b>12</b>
2.1.1 Importancia de las WSN.....	12
2.1.2 Aplicación de las WSN. ....	13
2.1.3 Tecnologías de comunicación inalámbrica para WSN.....	14
2.1.4 ZigBee / IEEE 802.15.4.....	16
2.1.4.1 Características de ZigBee.....	16
2.1.4.2 Tipos de dispositivos en una red ZigBee.....	17
2.1.4.3 Topologías ZigBee.....	18
2.1.4.4 Arquitectura de red. ....	19
<b>2.2 Vehículos Aéreos no Tripulados.....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Importancia de los UAV.....	20
2.2.2 Aplicación de los UAV. ....	21
2.2.3 Convergencia entre tecnologías WSN y UAV.....	22
2.2.4 Clasificación de los UAV. ....	27
2.2.5 Características y especificaciones técnicas del UAV Inspire 1. ....	27
CAPÍTULO III .....	29

<b>3</b>	<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....</b>	<b>29</b>
3.1	Introducción.....	30
3.2	Nodo remoto.....	31
3.2.1	Hardware del nodo remoto. ....	31
3.2.1.1	Obtención y acondicionamiento de variables meteorológicas del nodo.....	31
3.2.2	Software del nodo remoto.....	37
3.2.2.1	Firmware de obtención de variables meteorológicas del nodo remoto. ....	37
3.3	Nodo móvil.....	40
3.3.1	Hardware.....	41
3.3.1.1	Hardware del recolector de datos. ....	41
3.3.1.1.1	<i>Etapa de captación y reenvío de datos.</i> ....	41
3.3.1.1.2	<i>Etapa de procesamiento de información.</i> ....	42
3.3.1.1.3	<i>Etapa de almacenamiento.</i> ....	43
3.3.1.1.4	<i>Consumo de corriente.</i> .....	44
3.3.1.2	Hardware del repetidor de datos ....	47
3.3.1.2.1	<i>Consumo de corriente.</i> .....	48
3.3.2	Firmware. ....	50
3.3.2.1	Firmware para la arquitectura RECDAT. ....	50
3.3.2.2	Firmware para la arquitectura REPDAT ....	57
3.4	Nodo estación base.....	58
3.4.1	Hardware del nodo estación base. ....	58
3.4.2	Firmware del gateway en la estación base de monitoreo. ....	59
3.4.3	Aplicación de monitoreo. ....	60
3.5	Tecnologías inalámbricas de comunicaciones basadas en XBee. ....	65
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>68</b>
<b>4</b>	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
4.1	Pruebas de laboratorio .....	69
4.1.1	Simulación 1: enlace punto a punto.....	69
4.1.2	Simulación 2: enlace incluyendo un módulo Router.....	71
4.1.3	Simulación 3: enlace con altura de antena del router a 100m.....	73
4.1.4	Simulación 4: enlace con antena omnidireccional .....	76
4.1.5	Simulación 5: enlace con antena direccional .....	77
4.1.6	Prueba 1: autonomía en función del peso añadido. ....	80
4.1.7	Prueba 2: tamaño máximo de carga útil (Payload). ....	83
4.1.8	Prueba 3: frecuencia de envío de datos por nodo. ....	84
4.1.9	Prueba 4: frecuencia de envío de datos entre nodo.....	85
4.2	Prueba de campo .....	86
4.2.1	Prueba 1: test de rango en estado vinculado.....	86

4.2.2	Prueba 2: test de rango entre módulos no emparejados. ....	88
4.2.3	Prueba 3: test de altura. Antenas dipolo de 2dBi. ....	89
4.2.4	Prueba 4: test de altura. Antenas dipolo de 5dBi. ....	92
4.2.5	Prueba 5: funcionalidad del sistema completo. Cobertura. ....	93
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>99</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>102</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>104</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>112</b>
<b>ANEXO A: DISEÑO DEL MÓDULO A MONTARSE EN EL UAV .....</b>		<b>113</b>
A.1.	Diagrama de conexiones. ....	113
A.2.	Diseño de la tarjeta de circuito impreso. Parte superior. ....	114
A.3.	Diseño de la tarjeta de circuito impreso. Parte inferior. ....	114
A.4.	Diseño de la tarjeta de circuito impreso. Capa de serigrafía. ....	114
A.5.	Datasheet del dispositivo implementado. ....	115
<b>ANEXO B: TABLA DE COMANDO DE REFERENCIA.....</b>		<b>116</b>
<b>ANEXO C: DATASHEET DEL REGULADOR LINEAL DE VOLTAJE MIC5203-3.3BM4 .....</b>		<b>118</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura i.1 Proceso de desarrollo de los sistemas.....	4
Figura 1.1 Cobertura móvil a nivel de parroquias en Ecuador.....	8
Figura 1.2 Cobertura móvil 4G en Ecuador.....	9
Figura 1.3 Metodología en cascada realimentado.....	10
Figura 2.1 a) Componentes de un nodo o mota. b) Elementos de una WSN. ....	12
Figura 2.2 Topologías de redes ZigBee. ....	18
Figura 2.3 Arquitectura ZigBee. ....	19
Figura 2.4 Aplicaciones de los UAV. ....	21
Figura 2.5 (a) Quadróptero pulverizador (b) Hexacóptero para monitoreo. AR200 AirRobot .....	23
Figura 2.6 Drone de ala fija para análisis de biomasa.....	23
Figura 2.7 Escenario de aplicación. ....	24
Figura 2.8 Helicóptero Hero. Cámaras visual e infrarroja y sistema GPS y hardware requerido. ....	24
Figura 2.9 Máxima altura de vuelo (100m) del sistema de detección de plagas.....	25
Figura 2.10 Nodo de recolección de datos MAJA. ....	25
Figura 2.11 Esquema del funcionamiento del sistema MAJA.....	26
Figura 2.12 Agras MG-1. ....	26
Figura 3.1 Componentes REPDAT: a) nodo remoto, b) nodo móvil y c) nodo estación base.....	30
Figura 3.2 Componentes RECDAT: a) nodo remoto, b) nodo móvil y c) nodo estación base.....	30
Figura 3.3 Seeeduino Stalker V3. ....	31
Figura 3.4 Sensor RTH03. ....	32
Figura 3.5 Esquema para la adquisición del sensor RTH03 a) ADC b) Digital (interrupciones).....	33
Figura 3.6 Diagrama de conexión sensor STH10.....	34
Figura 3.7 Weather meters. ....	35
Figura 3.8 Weather Shield. ....	36
Figura 3.9 Acondicionamiento porcentaje de la batería.....	37
Figura 3.10 Asignación de entradas a variables específicas. ....	37
Figura 3.11 Diagrama de flujo para la obtención y procesamiento de señales del nodo remoto. ....	39
Figura 3.12 Diagrama de flujo que gestiona el envío de datos.....	40
Figura 3.13 Diagrama de flujo de datos del sistema en un entorno de interfaz UART. ....	41

Figura 3.14 Esquema de conexión entre los módulos de comunicación XBee y el microcontrolador.....	41
Figura 3.15 Esquema del sistema de procesamiento de información.....	42
Figura 3.16 UartSBee V4 (gateway USB-Xbee-TTL). .....	43
Figura 3.17 a) Esquema de conexión micro SD. b) Diagrama de pines. ....	43
Figura 3.18 Fase de filtrado de alimentación de micro SD. ....	43
Figura 3.19 Fuente de alimentación del prototipo. ....	45
Figura 3.20 Batería de LiPo. ....	45
Figura 3.21 Consumo de corriente en RECDAT. ....	46
Figura 3.22 Consumo para el nodo móvil en modo recolector. ....	47
Figura 3.23 Bosquejo de enlace en una arquitectura de repetición de datos. ....	47
Figura 3.24 Consumo para el nodo móvil en modo repetidor. ....	48
Figura 3.25 a) Esquema de conexión b) Diseño PCB c) Integración de componentes. ....	49
Figura 3.26 Trama ZigBee 0x10. a) Frame transmitido. b) Frame recibido. ....	51
Figura 3.27 Curva de carga (subida) de datos al nodo móvil en modo API. ....	51
Figura 3.28 Diagrama de flujo para la recepción de trama API (0x90) ZigBee. ....	52
Figura 3.29 Diagrama de flujo para la obtención del nivel de señal RSSI por comando AT_DB en una trama 0x08.....	53
Figura 3.30 Diagrama de flujo para la extracción de datos recolectados.....	54
Figura 3.31 Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos en formato CSV.....	55
Figura 3.32 Tiempo de intervención del puerto Serial en función al número de tramas. ....	55
Figura 3.33 Algoritmo para el cambio de nombre de un archivo CSV. ....	56
Figura 3.34 Diagrama de flujo del firmware RECDAT. ....	57
Figura 3.35 Firmware de REPDAT API 0x10 Transmit Request. ....	58
Figura 3.36 Hardware del nodo estación base. ....	58
Figura 3.37 Diagrama de flujo para la recepción (estación base de monitoreo). ....	59
Figura 3.38 Diagrama de flujo del algoritmo para la consola de monitoreo. ....	60
Figura 3.39 Panel de control del aplicativo de monitoreo. ....	61
Figura 3.40 Opción "Monitor" del aplicativo de escritorio. ....	62
Figura 3.41 Publicación de los datos recolectados en Ubidots.....	63
Figura 3.42 Opción "Gráficas" del aplicativo de escritorio. ....	63
Figura 3.43 Opción "Ruta" para el aplicativo de escritorio.....	64
Figura 3.44 Opción "Coordinador" del aplicativo de escritorio.....	64
Figura 3.45 Opción "Consola" del aplicativo de escritorio. ....	65
Figura 3.46 a) XBee S2, b) XBee S2 PRO y c) XBee PRO-900.....	65

Figura 4.1 Escenario de simulaciones. (Google Earth) .....	69
Figura 4.2 Diagrama del enlace con Radio Mobile del ED - C. (Simulación 1) .....	70
Figura 4.3 Comprobación de línea de vista enlace del ED - C. (Google Earth) .....	70
Figura 4.4 Diagrama del enlace entre ED - R. (Simulación 2) .....	71
Figura 4.5 Diagrama del enlace entre R – C. (Simulación 2).....	72
Figura 4.6 Comprobación de línea de vista enlace del ED - R. (Google Earth) .....	72
Figura 4.7 Comprobación de línea de vista enlace del R - C. (Google Earth) .....	73
Figura 4.8 Diagrama del enlace entre ED – R a 100 m. (Simulación 3) .....	74
Figura 4.9 Diagrama del enlace entre R a 100 – C. (Simulación 3).....	74
Figura 4.10 Comprobación de línea de vista enlace del ED - R. (Google Earth) .....	75
Figura 4.11 Comprobación de línea de vista enlace del R - C. (Google Earth) .....	75
Figura 4.12 a) Problema por desviación de ruta. b) Problema por vibraciones. c) Problema por altitud.....	76
Figura 4.13 Diagrama del enlace, a) ED - R1 b) R2 - C. (Simulación 4).....	77
Figura 4.14 Comprobación de línea de vista enlace entre ED - R1 - R2 - C. (Google Earth).....	77
Figura 4.15 Diagrama del enlace entre ED – R con antenas directivas. (Simulación 5) .....	78
Figura 4.16 Diagrama del enlace entre R - C con antenas directivas. (Simulación 5) .	79
Figura 4.17 Comprobación de línea de vista enlace del ED – R1. (Google Earth) .....	79
Figura 4.18 Comprobación de línea de vista enlace del R2 - C. (Google Earth).....	80
Figura 4.19 Peso de los sistemas completo.....	80
Figura 4.20 Peso de los sistemas completo.....	81
Figura 4.21 Curva de autonomía de vuelo vs peso. ....	81
Figura 4.22 Autonomía de vuelo con el sistema montado. Interfaz DJI GO. ....	82
Figura 4.23 Detalle de pesos .....	82
Figura 4.24 Respuesta al comando AT_NP sobre valor máximo de Trama. ....	83
Figura 4.25 Prueba de tamaño de trama de 92 caracteres. ....	83
Figura 4.26 Prueba de Payload de hasta 200 caracteres sin inconvenientes en recepción.....	83
Figura 4.27 Parcialización de trama como medio para aumentar el tamaño de Payload. .....	84
Figura 4.28 Error de código producido por una separación temporal inferior a 300ms. .....	84
Figura 4.29 Error de código producido por una separación temporal inferior a 300ms. .....	85
Figura 4.30 Pruebas de envío de tramas con separación temporal de un segundo. ...	85

Figura 4.31 Escenario de pruebas de campo.....	86
Figura 4.32 Ubicación y test de rango a 37m en estado vinculado.....	87
Figura 4.33 Ubicación y test de rango a 414m en estado vinculado.....	87
Figura 4.34 RSSI vs Distancia. Los dispositivos se mantienen emparejados. ....	88
Figura 4.35 Test de rango a 18m del nodo remoto. ....	88
Figura 4.36 Ubicación y test de rango en 180m. ....	89
Figura 4.37 RSSI vs Distancia. ....	89
Figura 4.38 a) Test de rango nodo móvil – estación. b) Antena dipolo 2 dBi.....	90
Figura 4.39 Alturas tomadas de la interfaz DJI GO a las cuales se hizo medidas de RSSI. .....	90
Figura 4.40 Test de rango a 15m de altura .....	91
Figura 4.41 Test de rango a 50m de altura .....	91
Figura 4.42 RSSI vs Altura .....	91
Figura 4.43 Test de rango nodo móvil-estación. Antenas dipolo. Polarización vertical. .....	92
Figura 4.44 Alturas tomadas de la interfaz DJI GO a las cuales se hizo medidas de RSSI. .....	92
Figura 4.45 Test de rango 61m.....	93
Figura 4.46 RSSI vs Altura con antena dipolo de 5 dBi.....	93
Figura 4.47 Actores para la prueba de las arquitecturas RECDAT y REPDAT.....	94
Figura 4.48 Pruebas con el sistema RECDAT. a) Transmisiones del nodo remoto. b) Archivo data.csv del nodo móvil.....	95
Figura 4.49 Pruebas con el sistema REPDAT. a) Transmisiones del nodo remoto y recepción en la opción consola de a interfaz de usuario. b) Visualización de los valores adquiridos.....	96
Figura 4.50 a) Distancia y altura del enlace. Dipolos de 2dBi. b) Altura (H) y distancia (D) a la que se ubicó el UAV y se mantenía el enlace.....	97
Figura 4.51 a) Distancia y altura del enlace. Dipolos de 5dBi. b) Altura (H) y distancia (D) a la que se ubicó el UAV y se mantenía el enlace.....	97
Figura 4.52 Sistema de repetición de datos. XBee S2 y antenas de 5dBi. ....	98
Figura 4.53 Sistema de recolección de datos. XBee S2 y antenas de 5dBi. ....	98

## ÍNDICE DE TABLA

Tabla 2.1 Comparativa de tecnologías inalámbricas.....	15
Tabla 2.2 Características de radio ZigBee .....	16
Tabla 2.3 Aplicaciones de UAV en el ámbito civil.....	22
Tabla 2.4 Clasificación de UAS de la OTAN. ....	27
Tabla 2.5 Características del UAV .....	27
Tabla 3.1 Características Seeeduino Stalker V3.....	32
Tabla 3.2 Características RTH03.....	32
Tabla 3.3 Especificaciones GPS/GP-635T.....	42
Tabla 3.4 Especificaciones XBee S2 / XBee PRO S2/ XBee-PRO 900.....	66
Tabla 3.5 Asignación de pines para los módulos XBee.....	67
Tabla 4.1 Localización de los equipos. ....	69
Tabla 4.2 Especificaciones simulación 1.....	70
Tabla 4.3 Especificaciones simulación 2.....	71
Tabla 4.4 Especificaciones simulación 3.....	73
Tabla 4.5 Especificaciones simulación 4.....	76
Tabla 4.6 Especificaciones simulación 5.....	78

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de titulación es brindar una solución frente a la problemática detectada de recolección de información de nodos ubicadas en zonas distantes (nodo remoto), aplicando Redes de Sensores Inalámbricos (*Wireless Sensor Networks, WSN*). La información obtenida es transportada hacia una estación base para su análisis, con cuanto se emplea el concepto de Vehículo Aéreo no Tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle, UAV*) para lograrlo. Sus aplicaciones pueden ser militar, medioambiental, médico, etc., en este contexto se plantea arquitecturas y medios de red que den solución a dicha problemática y generen un punto de divergencia crítico para posibles trabajos y mejoras futuras.

Se desarrolla dos arquitecturas para mejorar la conectividad de las WSN basadas en una topología estrella, estas son: “de recolección” y “de repetición”. En la primera se cargan datos hacia un nodo móvil donde son almacenados y luego se descargan de forma alámbrica o inalámbrica al llegar al nodo estación base. En la segunda se cargan datos desde el nodo remoto y se descargan instantáneamente hacia el nodo estación base.

**Palabras claves:** nodo remoto, nodo móvil, recolector, repetidor, nodo estación base, Red de Sensores Inalámbricos, Vehículos Aéreos no Tripulados.

## ABSTRACT

The objective of this research is to provide a solution to the detecting problem in gathering information of nodes located in remote areas (remote node), using Wireless Sensor Networks (WSN), The information obtained is transported to a base station for analysis to achieve this is employed the concept of, Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Their applications can be military, environmental or medical. In this context, the architectures and network media are proposes to provide solutions to this problem and generate a critical divergence for possible jobs and future improvements.

To improve the connectivity of the WSN, are developed two types of architectures based on a star topology; collection and repetition. In the first one, data is loaded to a mobile node where is stored and then is downloaded by wired or wireless communication to a node, when the UAV reaches the base station. In the second one, the data is uploaded from the remote node and downloaded instantly to the base station node.

**Key Words:** remote node, mobile node, collection, repetition, base station node, Wireless Sensor Networks, Unmanned Aerial Vehicle.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años las redes de sensores se han convertido en una tecnología novedosa por la variedad de aplicaciones donde se las destina, fomentando el interés para su estudio pues se perfilan como una de las tecnologías más competentes del futuro. En la actualidad el transporte de información se la realiza mediante tecnologías guiadas como: cable de par trenzado, cable coaxial o fibra óptica y no guiadas como: Bluetooth para comunicaciones de corto alcance (WPAN), Wi-Fi para redes de área local (WLAN), GPRS, WiMAX, LTE para redes de área metropolitana (WMAN), y satelital para redes de área amplia (WAN) [1].

El objetivo principal del presente trabajo es llevar a cabo el diseño e implementación de un prototipo de estación repetidora y recolectora de datos móvil, acuñada como: “nodo móvil”. Su función será capturar, almacenar y reenviar los datos de una Red Inalámbrica de Sensores RIS (en adelante WSN, Wireless Sensor Network) a través de un Vehículo Aéreo no Tripulado (en adelante UAV, Unmanned Aerial Vehicle). En uso del UAV acoplado al prototipo tiene como fin aumentar el alcance del enlace entre un nodo que obtiene los datos y está ubicado remotamente con la estación base donde se realiza la visualización de dichos datos.

Se pone a consideración una opción frente a un escenario de enlace sin línea de vista directa o un sustituto frente a redes que manejan tecnologías de red de área amplia implican el pago recurrente de planes de datos (GPRS) y sobre todo el ahorro de personal que se desplazaría hasta el lugar de medición para recoger manualmente los datos. En la Figura i.1 se muestra como se estructura las fases de desarrollo de los sistemas planteados.

La distribución de capítulos es la siguiente:

Capítulo I, se expone una breve introducción en la que se presenta los objetivos perseguidos en el desarrollo de este documento. Asimismo, la justificación y metodología empleada en el marco de trabajo en el cual se encuadra este trabajo de titulación.

Capítulo II, se realiza una introducción general a las WSN, además de numerosas importancias y aplicaciones que estas brindan, también se procede a ser una comparativa entre las diversas tecnologías inalámbricas adecuadas para las WSN. Se muestra aspectos importantes sobre los UAV como aplicación, clasificación y convergencia entre los UAV y las WSN de tal forma que se pueda seleccionar el equipo adecuado.

Capítulo III, se detalla las herramientas para la elaboración tanto del hardware como del software de las arquitecturas propuestas, así mismo como la interfaz visual para la estación base de monitoreo.

Capítulo IV, se realiza las pruebas de laboratorio y de campo realizadas durante el proceso

de implementación, describiendo detalladamente los resultados obtenidos con su respectivo análisis.

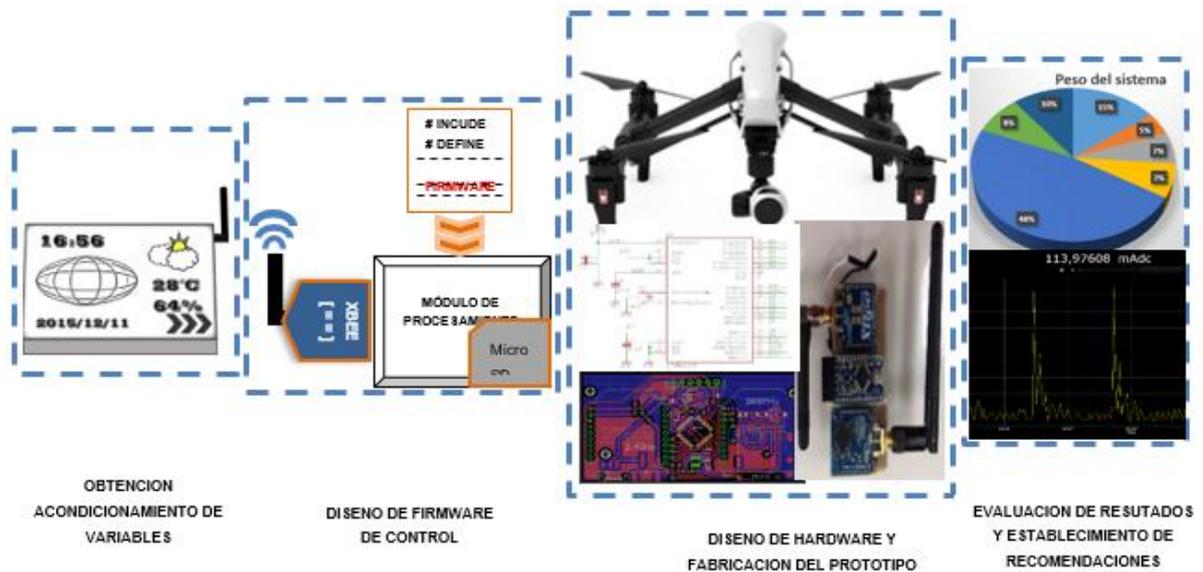


Figura i.1 Proceso de desarrollo de los sistemas.  
Fuente: Autores.

A lo largo de esta investigación se habla de tres actores que intervienen tanto en la arquitectura de repetición de datos (en adelante REPDAT) como en la de recolección de datos (en adelante RECDAT). Estos son: el nodo remoto que se encontrará en la estación terrena y es fijado en una zona alejada de la estación de monitoreo. La estación base que es el punto de control donde se analizan los datos recolectados, y por último el nodo móvil que tiene las funciones de REPDAT o RECDAT haciendo de interfaz entre los nodos descrito.

Cada función define una arquitectura. La arquitectura de RECDAT transporta datos almacenados desde los nodos remotos hacia la estación base. La arquitectura de REPDAT replica instantáneamente cada captura de variables de los nodos remotos en la estación base.

## ACRÓNIMOS

<b>ADC</b>	<i>Analog to Digital Converter</i>
<b>AT_DB</b>	<i>Comando AT para la obtención del RSSI</i>
<b>FTDI</b>	<i>Future Technology Devices International</i>
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Service</i>
<b>I<sup>2</sup>C</b>	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
<b>IoT</b>	<i>Internet de las Cosas</i>
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i>
<b>MIT</b>	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
<b>NWK</b>	<i>NetWork</i>
<b>OSI</b>	<i>Open System Interconnection</i>
<b>PHY</b>	<i>PHYsical</i>
<b>RECDAT</b>	<i>REColector de DATos</i>
<b>REPDAT</b>	<i>REPetidor de DATos</i>
<b>RSSI</b>	<i>Received Signal Strength Indication</i>
<b>RTC</b>	<i>Real Time Clock</i>
<b>SPI</b>	<i>Serial Peripheral Interface</i>
<b>SD</b>	<i>Secure Digital</i>
<b>USART</b>	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
<b>UAV</b>	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
<b>USB</b>	<i>Universal Serial Bus</i>
<b>Wi-Fi</b>	<i>Wireless Fidelity</i>
<b>WSN</b>	<i>Wireless Sensor Network</i>
<b>ZC</b>	<i>ZigBee Coordinator</i>
<b>ZDO</b>	<i>ZigBee Device Objects</i>
<b>ZED</b>	<i>ZigBee End Device</i>
<b>ZR</b>	<i>ZigBee Router</i>

## **CAPÍTULO I**

### **1 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general.**

- Diseñar e implementar un prototipo de estación repetidora y recolectora de datos móvil, para una WSN remota usando un UAV.

### **1.1.2 Objetivos específicos.**

- ✓ Seleccionar la topología de red idónea para la implementación de la WSN y establecer escenarios para su uso.
- ✓ Seleccionar la tecnología y protocolo de acceso al medio.
- ✓ Analizar herramientas de desarrollo de Open-software y Open-hardware disponibles.
- ✓ Implementar un prototipo más eficiente (peso) bajo condiciones establecidas del UAV comercial.
- ✓ Implementar hardware para las arquitecturas propuestas.
- ✓ Implementar software de control de la WSN - UAV que brinde funcionalidad al hardware elaborado.
- ✓ Desarrollar una interfaz de usuario de monitoreo y control de datos.
- ✓ Realizar pruebas en el laboratorio y en condiciones reales de los prototipos desarrollados.
- ✓ Establecer recomendaciones sobre el sistema incluyendo características de peso, autonomía, payload, polarización de antenas, cobertura.

## **1.2 Justificación**

Debido al impacto que han tenido las WSN respecto al mejoramiento de movilidad, automatización de eventos, seguridad, entre otras, de la información dado el campo de aplicación (comparable con el número mismo de variables físicas existentes a nuestro alrededor). Así mismo el desarrollo de redes de próxima generación que proporcionan el medio para lograr la convergencia tecnológica en post de la gestión, mantenimiento y control de dispositivos actuadores desde cualquier punto de acceso a la red (internet de las cosas). Resulta de gran importancia el estudio y análisis de las WSN con el fin de proponer mejoras u opciones al implementar sistemas basados en este concepto [2].

Las redes de sensores inalámbricos se basan en una serie de tecnologías, protocolos y estándares relativos al transporte de información hacia una estación base lejana. De aquí que la atención se centra en las opciones más adaptables de acuerdo al campo de aplicación. Actualmente este transporte se realiza por medio de tecnologías inalámbricas de área metropolitana y hasta de área amplia como: GPRS, LTE, satelital, etc. Estas tecnologías

requieren de pagos periódicos, un plan de datos, se encuentran limitados por el área de cobertura o una línea de vista directa entre emisor y receptor.

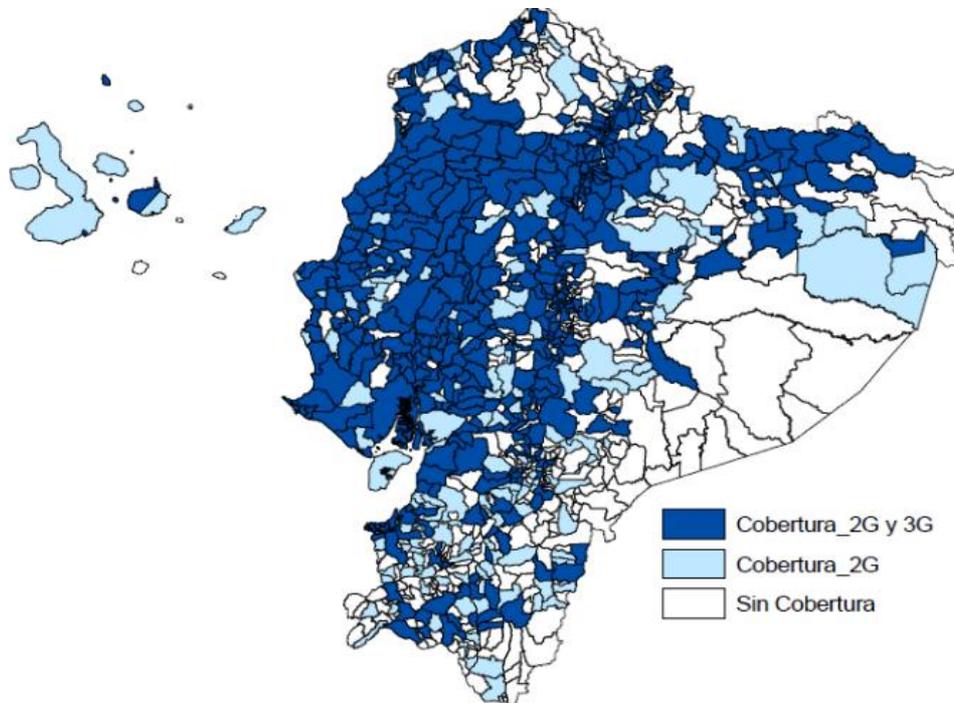


Figura 1.1 Cobertura móvil a nivel de parroquias en Ecuador.  
Fuente: [3].

El Servicio Móvil Avanzado en el boletín emitido en diciembre de 2014, menciona que el territorio ecuatoriano está cubierto un 72,62% en un análisis a nivel parroquial. El mayor porcentaje de cobertura se basa en tecnología 2G. Para 3G el porcentaje es de 40,39%. Con esto se logra abastecer un 96,58% de la población con tecnología móvil 2G y 87,9% con tecnología 3G (ver Figura 1.1). Existen 282 parroquias sin cobertura móvil, que representa 27,38% de territorio y 3,42% de población sin cobertura móvil [3].

En cuanto a tecnología 4G el operador público tiene desplegada su red en las ciudades principales del país con planes de expansión futura. De acuerdo al mapa del entorno web OpenSignal (fuente libre que se mantiene actualizando la cobertura y el rendimiento de conexión de los operadores móviles en todo el mundo) se estima que alrededor del 1% del Ecuador ya posee cobertura 4G (ver Figura 1.2).

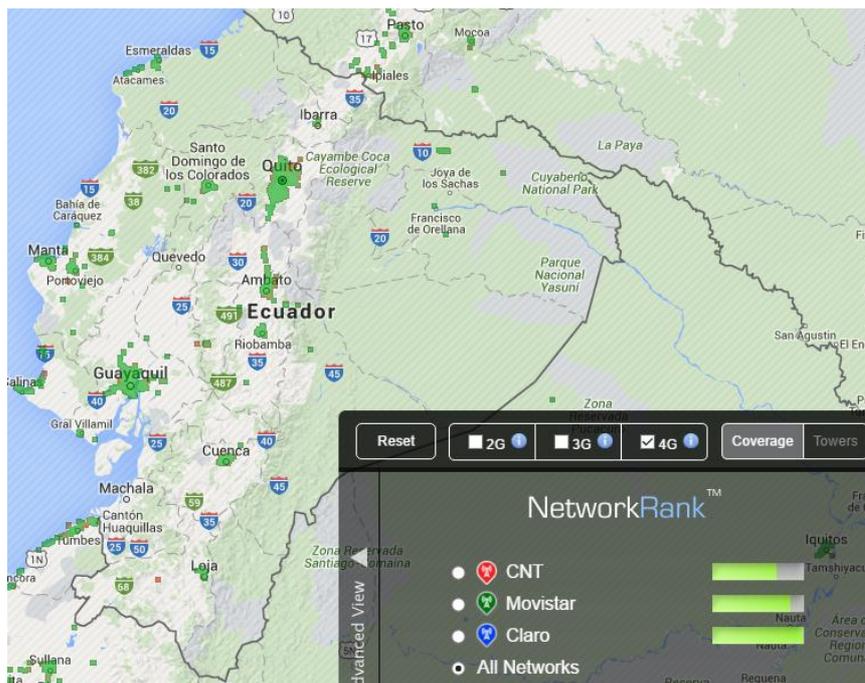


Figura 1.2 Cobertura móvil 4G en Ecuador.  
Fuente: OpenSignal.com.

En este trabajo de titulación se plantea un medio de transporte de información basada en tecnologías de red inalámbrica de área local (WLAN). Como parte de la propuesta se analiza el uso de un UAV con el fin de completar el requerimiento de alcance para establecer el enlace desde el nodo remota hasta el nodo base de monitoreo. Finalmente se propone dos arquitecturas para dicho fin: RECDAT y REPDAT, donde el concepto OpenSource formará parte modular del desarrollo de esta investigación.

### 1.3 Metodología

En este apartado se describe la manera en que se dará cumplimiento a los objetivos propuestos en el trabajo de titulación. La metodología seleccionada es el método en cascada realimentado (ver Figura 1.3) [4], que consiste en las siguientes etapas: definición de requerimientos, análisis y diseño, implementación y prueba de unidades, integración y prueba del sistema, operación y mantenimiento. Este modelo es progresivo pues cada nueva etapa da inicio al cabo la finalización de la anterior y existe una realimentación entre etapas que no afecta si hay cambios o evoluciones durante el desarrollo del proyecto.

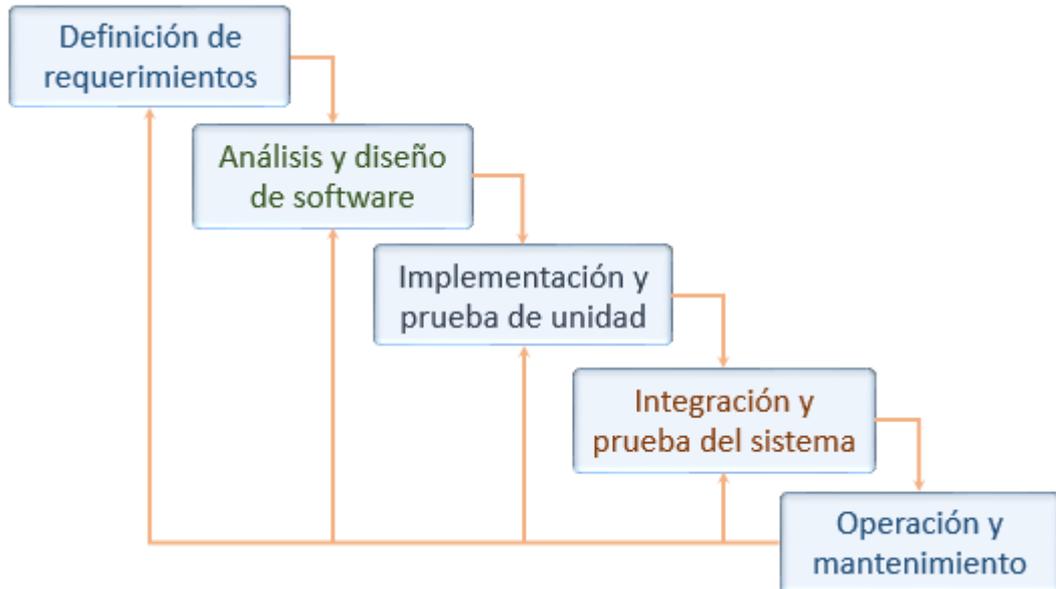


Figura 1.3 Metodología en cascada realimentado.  
Fuente: Autores.

- **Definición de los requerimientos:** se enfoca en los servicios que brinda el estudio como opción de transporte de información; en las restricciones y limitaciones respecto a cobertura, polarización de antenas, tasas de transferencia, peso añadido al UAV, etc., con el fin de dar cumplimiento a los objetivos. Se detalla los alcances del trabajo.
- **Análisis y diseño:** se divide los requisitos de software y hardware. Se establece la arquitectura general del sistema e identifica las herramientas y plataformas para su desarrollo.

Los firmwares de control desde el nodo remoto, móvil a gateway de estación base se encuentran basados en la plataforma Arduino. La interfaz de usuario se basa en la plataforma LabVIEW. El hardware (tarjetas de circuito impresas) se diseñó en el software CadSoft EAGLE.

- **Implementación y pruebas unitarias:** se procede a la construcción de las unidades de hardware y software. Realizando pruebas de funcionamiento modular.
- **Integración y pruebas del sistema:** se integran todas las unidades de software y hardware, procediendo a realizar pruebas en conjunto de todas las partes que conforman el sistema para verificar su funcionamiento.
- **Operación y mantenimiento:** el sistema se ejecuta y depura para luego realizar corrección de errores y mejoras en la implementación (se añaden nuevos requisitos para mejorar el alcance de la investigación).

## **CAPÍTULO II**

### **2 ESTADO DEL ARTE**

## 2.1 Redes de Sensores Inalámbricas

Las WSN son un conjunto de dispositivos autónomos conectados por enlaces inalámbricos que recogen información relativa al tipo de sensor [5]. Son autónomos porque poseen todo un conjunto de módulos de control, almacenamiento, alimentación y comunicación condensado en un pequeño dispositivo electrónico (ver Figura 2.1 a). Se lo puede ver como un sistema distribuido sin infraestructura de red. Poseen capacidades de ser auto-configurables, interactuar con el entorno a través de los sensores, procesar información local y poseer un programa de envío de información a sus vecinos más cercanos o a una estación base [6].

Es necesario minimizar el consumo de energía con el fin de extender la vida útil de las baterías y mantener operativa el nodo. La principal fuente de consumo de energía es el transceptor de radio [5] [7]. Por lo tanto, se requieren tecnologías de comunicación de bajo consumo en donde la cobertura y la conectividad no se vean afectados [8].

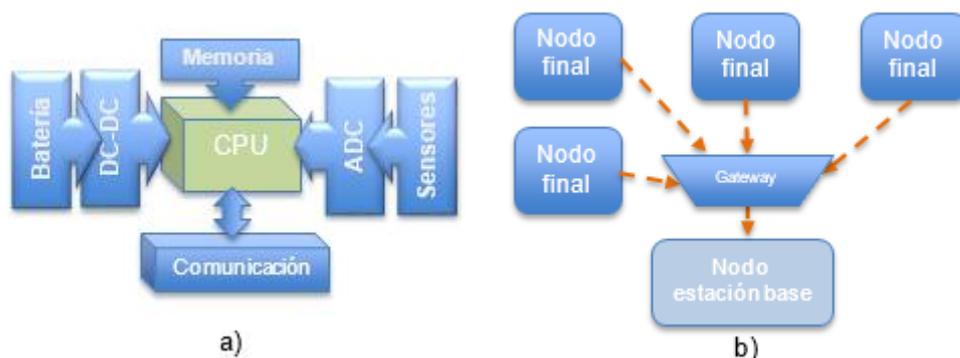


Figura 2.1 a) Componentes de un nodo o mota. b) Elementos de una WSN.  
Fuente: Autores

Los componentes de una WSN generalmente son: nodos finales, nodo Gateway y nodo estación base (ver Figura 2.1 b) [9]. El nodo final se encarga de capturar y enviar información hacia el nodo gateway. Los Gateways hacen de pasarela hacia el nodo estación base dado que traducen información de un estándar o protocolo a otro. Proporcionan interfaces como: Wi-Fi, Ethernet, USB, UART para conectar diferentes nodos fijos [10]. Por último, el nodo estación base es la encargada de almacenar, analizar y procesar la información recolectada por los nodos finales y traducida por el gateway [11].

### 2.1.1 Importancia de las WSN.

Su estudio se torna diverso y tiende a aumentar por las innumerables aplicaciones científico-civiles que se encuentran en boga [12]. El impacto de esta tecnología es comparable con Internet hace treinta años, el campo es específico a la aplicación. Sus limitaciones no se

encuentran completamente conceptualizados, así muchas de las aplicaciones investigadas aún no están disponibles [13].

El bajo consumo de energía, la coexistencia e integración con otro tipo de tecnologías, la interactividad directa del usuario final y el medio de medida, la ausencia de una infraestructura y topologías de red dinámicas han hecho de las WSNs el medio de divergentes de estudios cuantificable en función del número mismo de magnitudes físicas [14]:

### **2.1.2 Aplicación de las WSN.**

Las redes de sensores tienen una amplia variedad de aplicaciones [15] resaltando las siguientes:

- **Aplicaciones militares:**
  - ✓ Monitorización de fuerzas y equipos enemigos.
  - ✓ Vigilancia en el campo de batalla.
  - ✓ Reconocimiento del terreno.
- **Aplicaciones medioambientales:**
  - ✓ Seguimiento de animales.
  - ✓ Monitorización de las condiciones ambientales en cultivos.
  - ✓ Agricultura de precisión.
  - ✓ Detección de incendios forestales.
  - ✓ Estudios de contaminación.
  - ✓ Prevención de desastres.
- **Aplicaciones médicas:**
  - ✓ Telemonitorización de datos fisiológicos en pacientes.
  - ✓ Diagnóstico.
  - ✓ Administración de medicamentos.
- **Aplicaciones en el hogar/edificios:**
  - ✓ Domótica.
  - ✓ Control de electrodomésticos.
  - ✓ Entornos inteligentes.
- **Aplicaciones industriales:**
  - ✓ Seguimiento de vehículos.
  - ✓ Control de flota.
  - ✓ Control de inventarios.

### **2.1.3 Tecnologías de comunicación inalámbrica para WSN.**

La implementación de los estudios basados en WSN no tendría cabida si las tecnologías que gestionan y transportan la información no se desarrollan. Visto el potencial de las redes inalámbricas de sensores las industrias quienes desarrollan tecnologías de comunicación han sabido responder con prolijidad. Se ha pasado de comunicaciones punto a punto de corto alcance como el infrarrojo (IrDa), a comunicaciones punto a multipuntos de corto, medio y largo alcance como: Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, WiMAX, LTE, comunicaciones satelitales, etc., con soporte a multisalto [16]. Las tecnologías más usadas para las redes de sensores inalámbricos se describen en la Tabla 2.1. En esta tabla la mayoría de tecnologías son estándares IEEE.

Tabla 2.1 Comparativa de tecnologías inalámbricas.

	Wi-Fi	WiMAX Fijo	WiMAX Móvil	LTE	Bluetooth	ZigBee	LoRaWAN
<b>Estándar</b>	802.11ac	802.16a	802.16e		802.15.1	802.15.4	LPWA
<b>Movilidad</b>	Sí	No	Si < 120 Km/h	Si 0 – 15 Km/h	Si	Si	Si
<b>Velocidad</b>	1.3 Gbps	<70 o 100 Mbps (20 MHz)	<70 o 100 Mbps (20 MHz)	Downlink: 100 Mbps Uplink: 50 Mbps	Versión 1.2: 1 Mbps Versión 2.0: 3 Mbps Versión 3.0: 24 Mbps Versión 4.0: 32 Mbps	20 kbps: 868 MHz Europa 40 kbps: 915 MHz América 250 kbps: 2,4 GHz En todo el mundo	0.3 - 50 kbps (adaptativo)
<b>Cobertura</b>	< 70 m	5 a 50 Km	1,5 a 5 Km	5 Km	Clase 1: 100 m Clase 2: 15 – 20 m Clase 3: 10 m	1 – 100 m	15 - 22 Km
<b>Frecuencia de operación</b>	5 GHz	3.4 - 3.6 GHz 5.725 – 5.85 GHz	2.3 - 2.4 GHz 2.496 - 2.469 GHz 3.4 - 3.6 GHz	700MHz / 1700 - 2100 MHz CNT 1900 MHz Movistar 1700 MHz Claro	2,4 GHz	868/915 MHz 2,4 GHz	868 MHz Europa 915 MHz EEUU 433 MHz Asia
<b>Licencia</b>	No	Bandas con o sin licencia	Bandas con o sin licencia	Si	No	No	No
<b>Seguridad</b>	No	Sí	Sí	Si	Sí	Sí	Si
<b>Consumo</b>	Alto	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: Extraída de [16] [17] [18] [19] [20].

La tecnología escogida para este trabajo es 802.15.4 ZigBee. Su elección hace referencia a la adaptabilidad que otorga al ser un estándar IEEE, el bajo consumo de energía que representa menor carga mecánica añadida al UAV que reduce la autonomía de vuelo (una batería más pequeña), la capacidad de establecer un nivel seguridad en la gestión de datos (entramado). En esta investigación se usa un Vehículo Aéreo no Tripulado para compensar la disminución de distancia del enlace al cambiar de una tecnología amplio alcance por otra de medio. En este contexto 802.15.4 ZigBee con un alcance medio y la velocidad de transferencia relativamente baja respecto al resto de tecnología en comparación resulta apropiado.

#### 2.1.4 ZigBee / IEEE 802.15.4.

ZigBee es el resultado de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para utilizar con radios digitales de bajo consumo [21], basado en el estándar IEEE 802.15.4 [22] de redes WPAN's y tiene como objetivo el desarrollo de aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

La gran diferencia que posee 802.15.4 ZigBee sobre otras tecnologías es que está especialmente diseñada para redes de sensores de hasta 65535 nodos distribuidas en 250 subredes, con sus características nativas como: fiabilidad, bajo coste, bajo consumo, complejidad simplificada y tamaño pequeño. Esta tecnología destaca entre las demás por ser multisalto, es decir, tiene la capacidad de establecer una comunicación a través de otros nodos intermedios, de este modo se incrementa el área de cobertura de la red [23].

##### 2.1.4.1 Características de ZigBee.

ZigBee opera en la banda ISM con fines industriales, científicos y médicos, pueden trabajar a varias frecuencias (véase Tabla 2.2), pero al momento de diseñar dispositivos por parte de las empresas estas optan por la banda de 2,4 GHz por lo que está es libre a nivel mundial [24].

Tabla 2.2 Características de radio ZigBee

Frecuencia	Banda	Cobertura	Datos	Canales	Sensibilidad de recepción	Modulación
2,4 GHz	ISM	Mundial	250 kbps	16	-85 dBm	O-QPSK
868 MHz	ISM	Europa	20 kbps	1	-92 dBm	BPSK
915 MHz	ISM	América	40 kbps	10	-92 dBm	BPSK

Fuente: Extraída de [16]

Aunque tenga que convivir en la misma frecuencia con otros tipos de tecnologías como Wi-Fi o Bluetooth su desempeño no se ve afectado en lo más mínimo debido a su baja tasa de transmisión y a las características propias del estándar IEEE 802.15.4. Entre las características más importantes tenemos:

- **Redes y nodos:** una red ZigBee puede estar conformada por hasta 65.535 nodos en subredes de 255 nodos. La mayor parte del tiempo, inactivos con el fin de consumir menos energía.
- **Durabilidad de batería:** una mota equipada con ZigBee puede ser alimentada con pilas AA durante un tiempo de 6 meses o hasta 2 años.
- **Acceso al canal:** CSMA/CA (Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evitación de Colisiones).
- **Escalabilidad de red:** un mejor soporte para las redes más grandes, ofreciendo más opciones de gestión, flexibilidad y desempeño.
- **Cobertura:** rango de distancia entre 1 – 100m [25].

#### **2.1.4.2 Tipos de dispositivos en una red ZigBee.**

Se determinan tres tipos de dispositivos según su función en una red ZigBee [26]:

- **Coordinador ZigBee** (ZigBee Coordinator, en adelante ZC). En la red únicamente debe existir uno y es el tipo de dispositivo más completo, es el encargado de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos. En definitiva, la función del ZC es gestionar la red.
- **Router ZigBee** (ZigBee Router, en adelante ZR). Realiza las funciones de interconectar los dispositivos separados en la topología de la red y también de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución del código de usuario.
- **Dispositivo final ZigBee** (ZigBee End Device, en adelante ZED). Posee la funcionalidad para comunicarse con su nodo padre (ZC o ZR), pero no para transmitir información destinada a otros dispositivos. Puede estar en modo POWER\_SAVING la mayor parte del tiempo, aumentando así el tiempo de vida útil de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y resulta más barato.

Una vez especificado el funcionamiento de cada uno de los dispositivos, se puede plantear una segunda clasificación según su funcionalidad [21] [27] [28]:

- **Dispositivo de funcionalidad completa** (Full Functionality Device, en adelante FFD). También llamado nodo activo, capaz de recibir mensajes en formato 802.15.4. Debido a su memoria adicional y capacidad de cómputo puede funcionar como ZC o ZR, o

pueden ser destinados como dispositivos de red que actúen de interfaz con los usuarios.

- **Dispositivo de funcionalidad reducida** (Reduced Functionality Device, en adelante RFD). También llamado nodo pasivo por su capacidad y funcionalidad limitadas con el fin de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

### 2.1.4.3 Topologías ZigBee.

La especificación ZigBee permite tres topologías de red (ver Figura 2.2) [29]:

- Topología en estrella “Star”: el coordinador se encuentra en el centro.
- Topología en árbol “Tree”: el coordinador será la raíz del árbol.
- Topología en malla “Mesh”: al menos uno de los nodos tendrá más de dos conexiones.

En la Figura 2.2 se muestra las topologías red bajo el formato ZigBee.

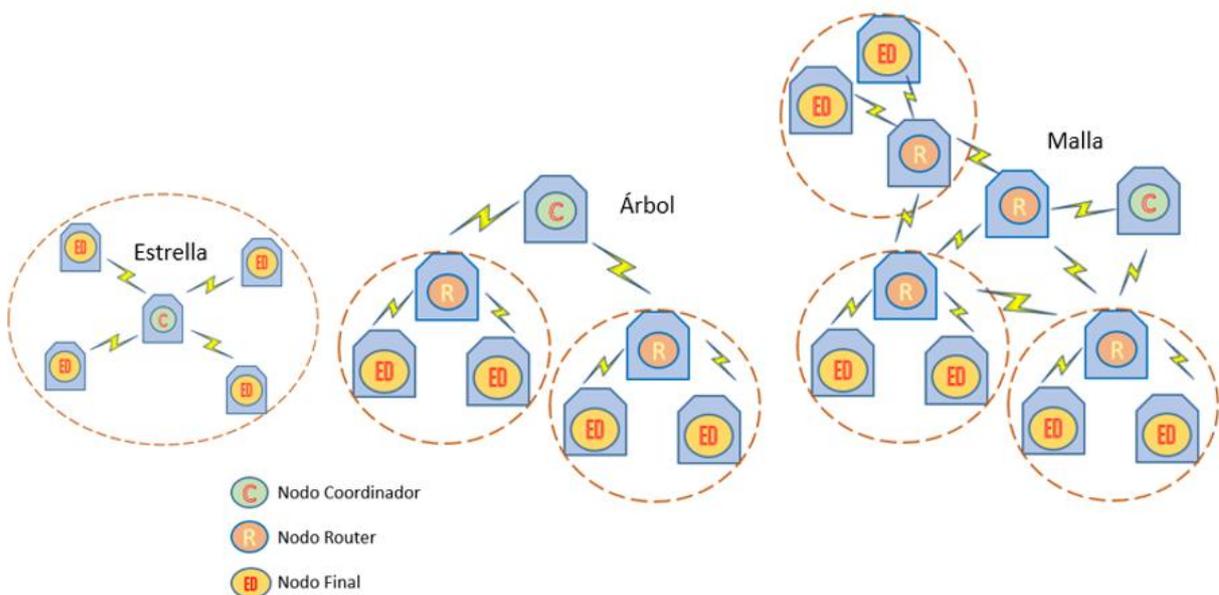


Figura 2.2 Topologías de redes ZigBee.

Fuente: Autores.

La topología más compleja que proporciona mayor funcionalidad en ZigBee es en malla. Se puede ver como una fusión de las anteriores topologías. La fiabilidad en el transporte de información aumenta conforme el número de nodos pertenecientes a la red, es decir, si en un momento dado un nodo de una ruta establecida falla se puede cambiar la ruta de comunicación entre todos los demás nodos adyacente hasta llegar al coordinador de red [29].

Como todos los datos convergen en un mismo punto (nodo móvil) la topología estrella definiría a la arquitectura REPDAT. Para la arquitectura RECDAT la función del nodo móvil es

de transportar información hacia el nodo estación base, por lo que quedaría definido bajo el concepto de una topología árbol.

#### 2.1.4.4 Arquitectura de red.

ZigBee es una pila de protocolos, que siguen el modelo de referencia OSI (Open System Interconnection) y está constituida por diferentes capas, las cuales son independientes una de la otra. En la Figura 2.3 se muestran las diferentes capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee.

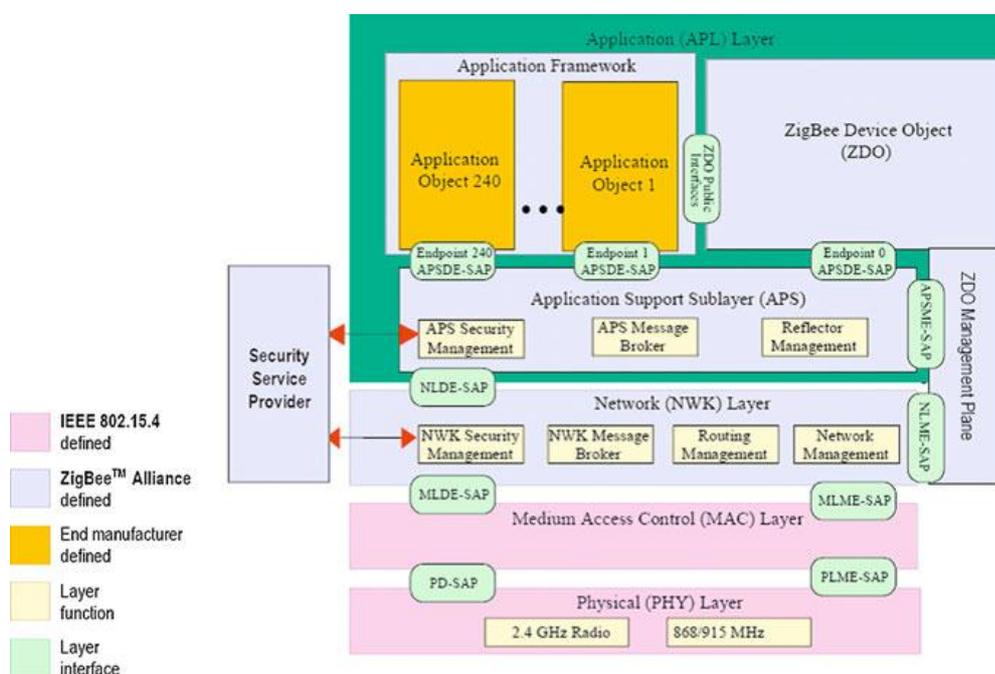


Figura 2.3 Arquitectura ZigBee.  
Fuente: Extraída de [30].

La arquitectura que define el formato ZigBee consta de: capa física (PHYSICAL, en adelante PHY), capa de Control de Acceso al Medio (Medium Access Control, en adelante MAC) y la capa de red ZigBee (NetWork, en adelante NWK). La capa de aplicación de ZigBee a su vez se subdivide en: Aplicación Support (en adelante APS) y ZigBee Device Objects (en adelante ZDO) [16], los objetivos de la capa de aplicación son definidos por cada uno de los fabricantes.

La capa de más bajo nivel es la capa PHY, y en conjunto con la capa MAC son capaces de brindar los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas se encuentran más detalladas en el estándar IEEE 802.15.4-2006 [31] [32].

El objetivo principal de la capa NWK es permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz correcta para su uso por parte de la capa de aplicación. Esta capa provee los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutamiento de paquetes para otros

nodos en la red, garantiza la entrega del paquete al destinatario final, filtra paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos.

La subcapa APS proporciona una interfaz entre las capas NWK y aplicación, mediante un conjunto de servicios que se utilizan junto a los ZDO y demás objetos que hayan sido definidos por los fabricantes. La capa APS mantiene el rol que el nodo actúa en la red, filtra los paquetes a nivel de aplicación y simplifica el envío de datos a los diferentes nodos de la red.

En el nivel más alto de la pila de arquitectura de ZigBee se encuentran los ZDO, responsables de definir el papel del dispositivo en la red ya sea ZC, ZR o ZED, la capa APS y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.

## **2.2 Vehículos Aéreos no Tripulados**

Los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) simbolizan la evolución a un nuevo paso de la aeronáutica que permitirá disminuir el coste de la gestión de seguridad e impulsar el surgimiento de nuevas oportunidades para expandir tecnologías que se encuentran dispersas en otros campos [33]. Se define como una aeronave no tripulada a aquella que es apta para realizar misiones sin necesidad de contar con una tripulación embarcada. Esta condición no descarta la existencia del piloto, controlador de misión u otros operadores, que pueden realizar su trabajo desde tierra [34].

El reto actual de las industrias fabricantes de sistemas no tripulados es el aumento en la autonomía del vehículo. Aunque inicialmente son fueron usados para la defensa y seguridad por lo que la inversión para estos vehículos precedida de tecnologías de punta fuese millonaria. El aumento en aplicaciones civiles ha hecho que tanto los medios mecánicos como electrónicos logre abaratar su precio. Hoy en día se aplican en cualquier ámbito con fines de observación, vigilancia y reconocimiento, especialmente en situaciones críticas o que presentan algún riesgo humano [35].

### **2.2.1 Importancia de los UAV.**

El interés en el desarrollo de UAV, tanto a nivel de centros de investigación como de usuarios potenciales se debe a la múltiple utilidad que facilitan. Se identifica entonces el beneficio evidente: “eliminar el factor humano”, pudiendo cubrir tareas básicas como fotografía y grabación de video hasta realizar tareas complejas como diagnósticos agrícola-medioambiental, exposición a ambientes hostiles radiactivos, bacteriológicos o químicos. [36].

De acuerdo a [37] [38] se sabe que la aplicación más común es militar, aunque poco a poco aumenta su uso en el campo civil (ver Figura 2.4). Teal Group, un equipo de analistas experimentados y profesionales sobre la industria aeroespacial y de defensa manifiesta que Vehículos Aéreos no Tripulados continúan como el sector de crecimiento más dinámico de la industria aeroespacial, el estudio de mercado emitido en 2015 muestra una triplicación del mercado durante la próxima década (de \$ 4 mil millones al año a \$ 14 mil millones, por un total de \$ 93 mil millones en los próximos diez años). El gasto en investigación UAV militares añadiría otros \$ 30 mil millones [38].

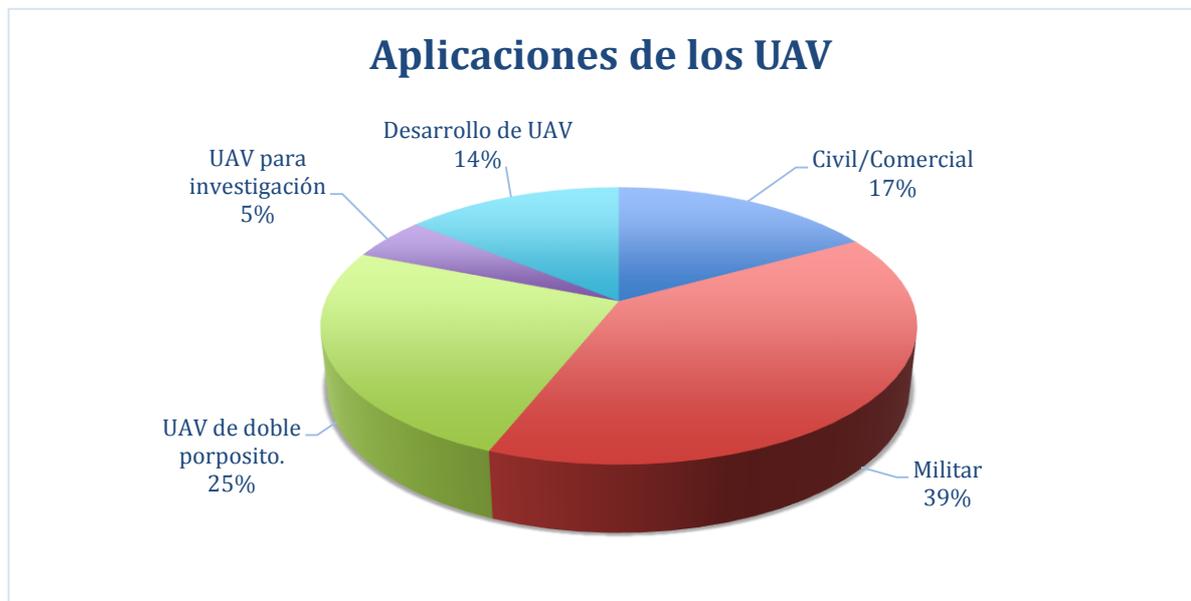


Figura 2.4 Aplicaciones de los UAV.  
Fuente: Extraída de [37].

Las múltiples posibilidades auguran un futuro prometedor para esta tecnología. Según aproximaciones de la Comisión Europea, en los futuros diez años los UAV para aplicaciones civiles podrían suponer el 10% del mercado total de la aviación [6] [38].

### 2.2.2 Aplicación de los UAV.

Los UAV completan tareas donde el factor humano se vuelve una limitante debido al riesgo que esta representa. Estos UAV de acuerdo a sus funciones y características se aplican en campos militares o civiles [39].

- **Aplicaciones militares:** se destinan principalmente en combate aéreo no tripulado, acciones estratégicas de vigilancia y seguimiento de posiciones enemigas. Establecen enlaces de comunicación con estaciones terrestres para intercambiar información.
- **Aplicaciones civiles:** representan un papel muy importante. Se han adaptado para el transporte de pequeñas cargas, mensajería, entrega de comida. Debido al nivel de

maniobrabilidad se les asigna tareas de acceso a zonas de difícil acceso, inspección de incendios, fumigación aérea, reconocimiento de áreas forestales, etc.

De acuerdo al ámbito civil en la Tabla 2.3 se especifica la aplicación de los UAV.

Tabla 2.3 Aplicaciones de UAV en el ámbito civil.

<b>Campo</b>	<b>Aplicaciones</b>
Fotografía y video.	Noticias e imágenes para servicios de información, generación de planos, etc.
Agricultura	Monitorización de cultivos, fumigación, etc.
Guardacostas	Búsqueda y rescate, monitorización de costas y entorno marino, protección de zonas de pesca, etc.
Aduanas	Monitorización y control para evitar importaciones ilegales, seguridad y control fronterizo, etc.
Compañías energéticas (electricidad, gas)	Mantenimiento de líneas de suministro, monitorización de centros de generación, transformación y distribución, etc.
Servicios forestales y de parques naturales	Detección y control de incendios, monitorización de flora y fauna, control de polución, etc.
Servicios meteorológicos	Muestre y análisis de la atmósfera para la previsión, etc.
Fenómenos naturales	Investigación atmosférica, monitorización de terremotos, volcanes y huracanes, etc.
Geología e hidrología	Control del curso y nivel de ríos, control de la contaminación, etc.
Urbanismo	Seguimiento y control de obras y su impacto, monitorización de instalaciones de suministros, etc.
Servicios de telecomunicaciones	Comunicaciones de banda ancha, sistema de ampliación de señal, etc.

Fuente: Extraída de [6].

### **2.2.3 Convergencia entre tecnologías WSN y UAV.**

Aplicaciones en las que convergen las tecnologías WSN y UAV tenemos como ejemplo el proyecto RHEA (2015) para la detección de manchas de malezas en campos agrícolas, financiado por la Unión Europea para disminuir un 75% en el uso de agroquímicos y mantener la seguridad alimentaria [40]. La estación base se compone de una caseta junto al campo de trabajo, equipada con un ordenador y un software para planificar y controlar misiones de las unidades terrestres y aéreas.

Un dispositivo inalámbrico y una antena de GPS han sido instalados para permitir una comunicación en tiempo real con cada una de las unidades móviles. Las unidades móviles terrestres se basan en un tractor Boomer T3050. Equipado para la detección de malas hierbas

(sensor láser, cámara de visión, etc.). Las unidades móviles aéreas se basan en un hexacóptero de 1,6 kg y carga útil de 680g (ver Figura 2.5 (b)), capaces de transportar y controlar pequeñas cámaras que sondean los campos y generan mapas de infestación. Posteriormente esta información activa una flota autónoma de pulverizadores equipados con sistemas de control de inyección para el pulverizado diferenciado del herbicida en las zonas marcadas del campo (ver Figura 2.5 (a)).



Figura 2.5 (a) Quadc6ptero pulverizador (b) Hexac6ptero para monitoreo. AR200 AirRobot  
Fuente: Extraída de [40]

Otro ejemplo similar equipa a drones de ala fija (ver Figura 2.6) con c6maras multiespectral e hiperespectral, incluyendo t6rmica para el an6lisis de biomasa a partir de la clorofila o carotenoides contenido, en la viña, c6tricos, melocot6n y olivos relacionada con la fotos6ntesis [41].



Figura 2.6 Drone de ala fija para an6lisis de biomasa.  
Fuente: Extraída de [41]

La aplicaci6n de pesticidas y fertilizantes en zonas agr6colas resulta importante para mantener el r6gimen de cosechas. En [41] se describe una arquitectura para abordar el problema del ajuste de las rutas UAV al rociar productos qu6micos en un campo de cultivo (ver Figura 2.7). Se propone un auto-ajuste de ruta por retroalimentaci6n de los nodos fijos necesaria por

cambios en la intensidad y dirección del viento. Se logra con esto reducir residuos de pesticidas y fertilizantes.

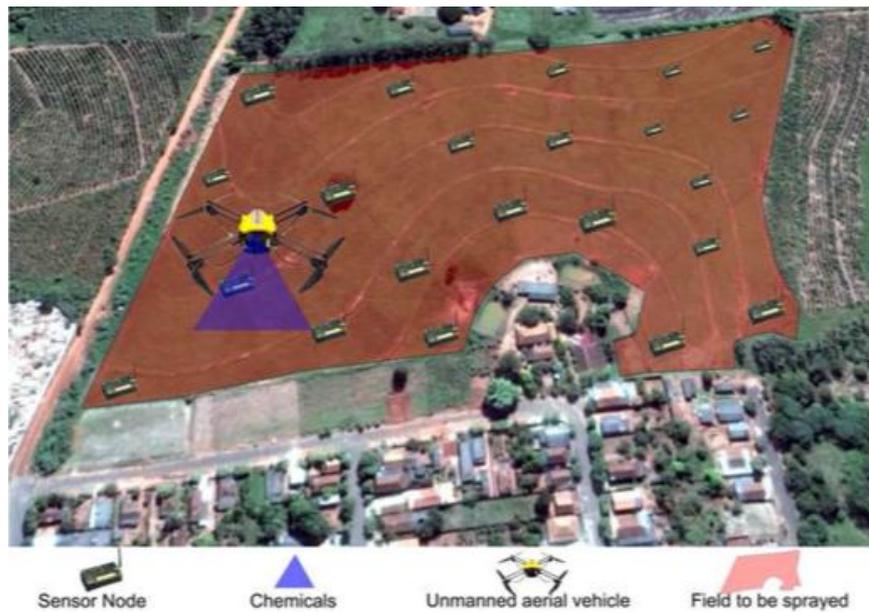


Figura 2.7 Escenario de aplicación.  
Fuente: Extraída de [41].

La Figura 2.8 muestra el helicóptero HERO equipado con GPS, y un sistema de sensores basados en cámaras de luz normal e infrarrojos instalados en una unidad de giro e inclinación. La plataforma HERO se ha utilizado para la detección de incendios [42].



Figura 2.8 Helicóptero Hero. Cámaras visual e infrarroja y sistema GPS y hardware requerido.  
Fuente: Extraída de [42].

En [43] se diseña una WSN para monitorear un entorno agrícola por medio de un UAV que recupera los datos almacenados en nodos fijos. El trabajo adicional del drone es recoger información de observación del campo para detectar plagas, enfermedades, sectores de mayor humedad, sequía o inundaciones (ver Figura 2.9). Así mismo se analiza el hecho de usar un UAV multi-rotor o de ala fija respecto a su autonomía de vuelo, carga útil, maniobrabilidad. Se opta por usar un UAV de ala fija porque deben recorrer un terreno extenso, poseen mayor autonomía y no brindarán tanta maniobrabilidad.

Los nodos fijos se distribuyen a lo largo del terreno y se mantienen comunicados entre sí transmitiendo datos continuamente. El nodo móvil recogerá información cuando se encuentre dentro del área de cobertura a una altura de casi 100m, aunque típicamente vuela a 20m. La velocidad máxima del avión es 18m/s por lo que, en 19,5m durante 1.082s recepta datos.

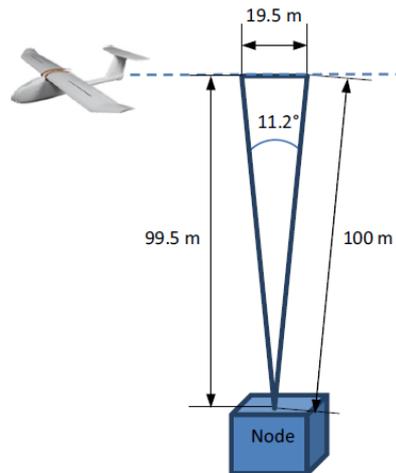


Figura 2.9 Máxima altura de vuelo (100m) del sistema de detección de plagas.  
Fuente: Extraída de [43].

En [44] se establece la arquitectura de comunicación para UAV como nodos móviles en recopilación de datos de una WSN. Su enfoque de aplicación es a nivel ambiental. Equipan el nodo móvil con dos interfaces de radio diferentes para permitir una comunicación bidireccional con la red de sensores fijos (ver Figura 2.10). Se ofrece QoS e incluye el análisis de la tasa de datos recogidos en función de las diferentes velocidades de vuelo. Los datos se almacenan temporalmente en los nodos de origen hasta que el móvil los recoge en un solo salto.



Figura 2.10 Nodo de recolección de datos MAJA.  
Fuente: Extraída de [45]

En [45] lo aplican en la localización de personas. Los actores que participan son: un dispositivo de localización de la persona (BodyGuard-System) que funciona como nodo remoto, una estación de retransmisión móvil, y una estación base (ver Figura 2.11). Por medio de un giroscopio, un magnetómetro y un acelerómetro posicionan a la persona u objeto seguido. Funciona con el módulo de RF AtzB-900-B0. El nodo móvil es un avión de alas fijas MAJA de cerca de una hora de autonomía. La partida y aterrizaje deben ser controlados. Estos aviones utilizan diferentes sistemas de radio con respecto a la tecnología de transmisión de datos.

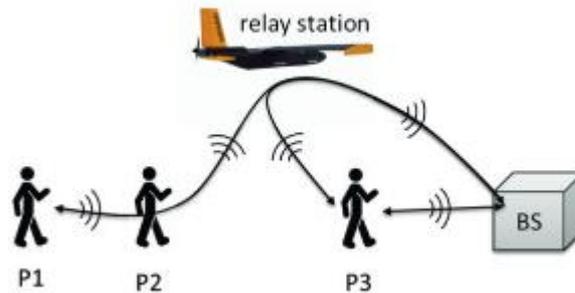


Figura 2.11 Esquema del funcionamiento del sistema MAJA.  
Fuente: Extraída de [45]

Otra aplicación se detalla en [46]. El DJI Agras MG-1 (ver Figura 2.12) es un Octocopter aplicado en agricultura de precisión de la compañía DJI. Transporta hasta 10kg de carga útil (pesticidas, fertilizantes, aplicador). Cubre áreas de 4.000-6.000 m<sup>2</sup> en sólo 10min, o 40 a 60 veces más rápido que las operaciones de pulverización manuales. El sistema de pulverización se ajusta automáticamente de acuerdo a la velocidad de vuelo. De esta manera, la cantidad de pesticida o fertilizante es regulada para evitar una contaminación excesiva. Se puede elegir entre el modo inteligente, asistido o manual de vuelo ya que posee un algoritmo avanzado de vuelo.



Figura 2.12 Agras MG-1.  
Fuente: Extraída de [46].

## 2.2.4 Clasificación de los UAV.

Aunque no existe un único criterio avalado internacionalmente para la clasificación de UAV, el JCGUAV (Joint Capability Group on UAV) de la OTAN en 2011 realizó una propuesta para clasificar los UAV de uso militar basado en la capacidad de transportar carga, el uso y perfil de vuelo [47], con el fin de normalizar la licencia para operadores a través de su agencia de estandarización. Esta clasificación se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Clasificación de UAS de la OTAN.

Clase (MTOW)	Categoría	Empleo	Altitud de operación AGL	Radio de Misión
CLASE I ≤ 150 Kg	MICRO < 2 Kg	Táctico (Sección)	Hasta 200 pies	5 Km (LOS)
	MINI 2 – 20 Kg	Táctico (Compañía)	Hasta 1.000 pies	25 Km (LOS)
	LIGEROS > 20 Kg	Táctico (Batallón)	Hasta 1.200 pies	50 Km (LOS)
CLASE II ≤ 600 Kg	TÁCTICO	Táctico (Brigada)	Hasta 10.000 pies	200 Km (LOS)
CLASE III > 600 Kg	MALE (Medium Altitude Long Endurance)	Operacional	Hasta 45.000 pies	Sin Límite (BLOS)
	HALE (High Altitude Long Endurance)	Estratégico	Hasta 65.000 pies	Sin Límite (BLOS)
	Combate	Estratégico	Hasta 65.000 pies	Sin Límite (BLOS)

Fuente: Extraída de [47] [48].

## 2.2.5 Características y especificaciones técnicas del UAV Inspire 1.

El UAV usado en este trabajo de titulación se trata de un modelo comercial de la categoría ligera de la compañía DJI. Se describen las características del sistema de monitoreo (véase Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Características del UAV

Vehículo aéreo	
Modelo	T600
Peso completo	2935 g

<b>Precisión al paso con uso de GPS</b>	Vertical: 0.5m, horizontal de 2.5m
<b>Velocidad Máxima</b>	Ascenso 5m/s, descenso 4m/s, horizontal 22m/s
<b>Inclinación máxima</b>	35° con resistencia a viento de 10 m/s
<b>Techo máximo</b>	4500 msnm, 120m por encima del punto de despegue
<b>Autonomía de vuelo</b>	18min
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	-10°C a 40°C
<b>Densidad Espectral de Potencia</b>	9.06mW/MHz
<b>Control remoto</b>	
<b>Frecuencia de operación</b>	2.400-2.483 GHz, 5.725-5825 GHz
<b>Máxima distancia de transmisión</b>	3.5km con plano de vista
<b>PIRE</b>	2.4dBm a 2.4GHz
<b>Batería</b>	6000 mAh LIPO
<b>Potencia de salida</b>	9W
<b>Batería</b>	
<b>Capacidad</b>	4500mAh a 22.2V, 99.9Wh - LiPo 6S
<b>Peso neto</b>	570g

Fuente: Extraída de [49].

Otras características importante e incorporada en el INSPIRE 1 es la geo-localización, se encuentra equipado con un sistema GPS llamado Live MAP que permite maniobrabilidad sobre un mapa, trazado de rutas a seguir y ubicación del vehículo. Esto viene acompañado por un sistema de vuelta al punto de partida o DINAMIC HOME POINT. Además, vuelo por telemetría, es decir todos los datos respecto al vuelo como nivel de batería, altura de vuelo, velocidad calculada de viento entre otros parámetros que se pueden ver a través de la aplicación, propiedad de la compañía DJI la podemos encontrar en [50].

## **CAPÍTULO III**

### **3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN**

### 3.1 Introducción

Este capítulo describe las partes involucradas para definir las arquitecturas RECDAT y REPDAT en hardware y software (firmwares de los nodos remoto, móvil y estación base). En las Figura 3.1 y 3.2 se ilustra los componentes de cada uno de los actores de red.

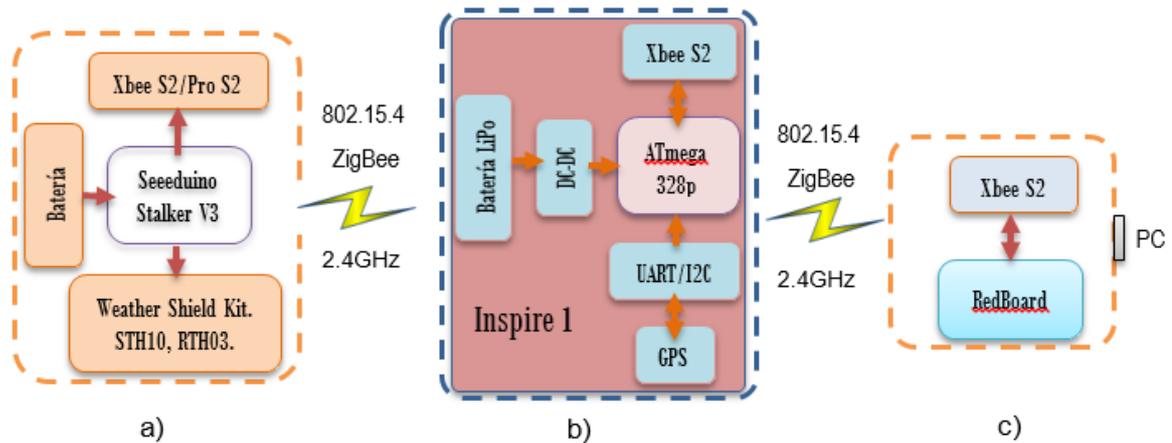


Figura 3.1 Componentes REPDAT: a) nodo remoto, b) nodo móvil y c) nodo estación base. Fuente: Autores.

Cada nodo remoto posee un módulo de comunicación basado en el estándar 802.15.4 ZigBee que transmite a la dirección MAC de uno de los módulos de nodo móvil. El nodo móvil tiene embebido un par de módulos bajo el mismo estándar con los que forma dos enlaces para cargar y descargar datos. Los enlaces tienen su propio identificador de red (PAN ID). En REPDAT se configuran en modo API ambos pares de módulos. Al efectuarse una transmisión desde el nodo remoto se retransmiten instantáneamente al gateway del nodo base. El Gateway del nodo base también tiene un módulo de comunicación para obtener los valores a que se mostrarán en la interfaz de usuario. Se aclara que tanto nodo remoto como estación base tienen simetría espacial establecida por el nodo móvil.

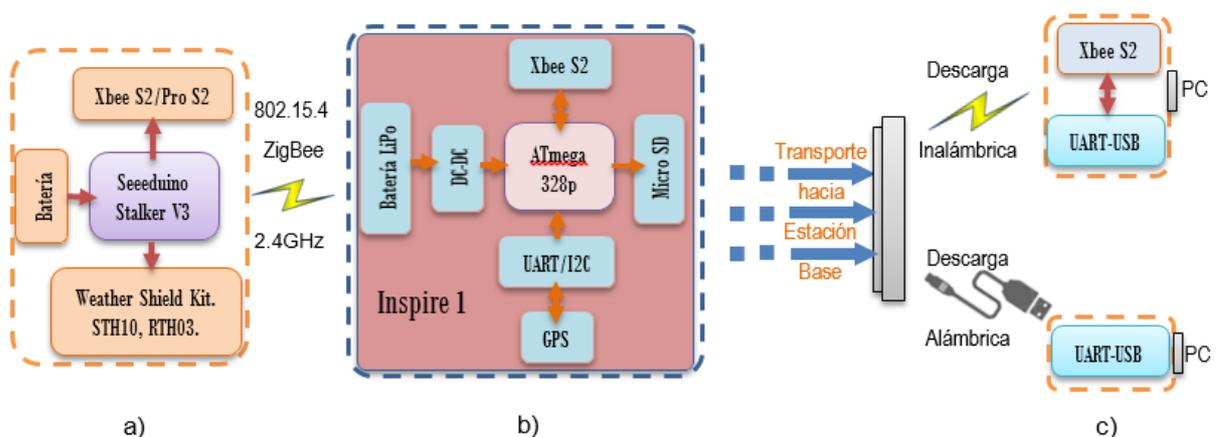


Figura 3.2 Componentes RECDAT: a) nodo remoto, b) nodo móvil y c) nodo estación base. Fuente: Autores.

En RECDAT el nodo remoto transmite hacia uno de los módulos del móvil (direccionado por MAC). Este enlace tiene un modo de comunicación API. Los datos se almacenan y se transportan hacia la estación base donde se pueden descargar vía enlace inalámbrico (par de módulos configurados en modo AT) o vía alámbrica a través de una interfaz UART-FTDI.

El microcontrolador usado para implementar los tres nodos de acuerdo a las arquitecturas planteadas es el ATMEGA328P. Para la implementación de los diferentes algoritmos se usa la plataforma Arduino por poseer características de codificación en alto nivel, más las facilidades de librerías específicas para cada uno de los sensores, actuadores, módulos de comunicación, la maniobrabilidad y rapidez para realizar test, la compatibilidad con el lenguaje de programación C++, aparte de la facilidad para conseguir placas de desarrollo, permiten simplificar la programación para la obtención de datos y coordinación de eventos. Los firmwares se representan por medio de diagramas de flujo con el fin de categorizar la función de cada nodo.

### 3.2 Nodo remoto

Un nodo remoto es un nodo final que se encarga de obtención diferentes magnitudes relativas al tipo de sensor y las transmite hacia el nodo móvil. Su ubicación geográfica es distante respecto al nodo estación base.

#### 3.2.1 Hardware del nodo remoto.

##### 3.2.1.1 Obtención y acondicionamiento de variables meteorológicas del nodo.

En total se obtuvieron 10 variables entre directas y derivadas. Cada nodo concentra sus datos en una tarjeta Seeeduino Stalker V3 (ver Figura 3.3), especializada en redes de sensores e internet de las cosas (IoT), que incluye un socket tipo BEE. Sus características se exponen en la Tabla 3.1.

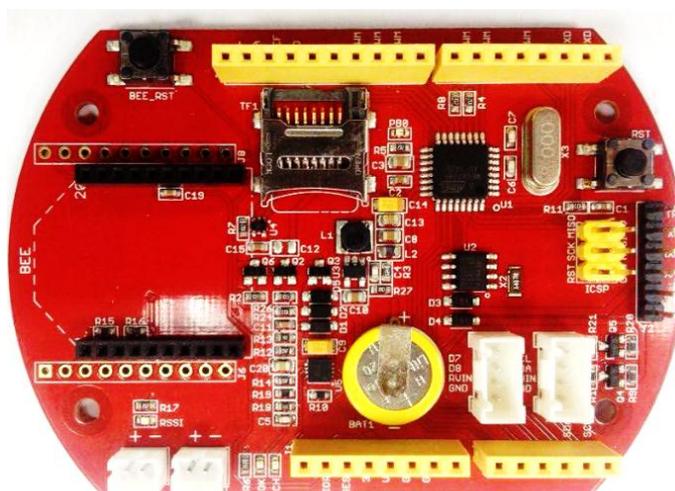


Figura 3.3 Seeeduino Stalker V3.  
Fuente: Autores.

Tabla 3.1 Características Seeeduino Stalker V3.

Parámetro	Valor
MCU	ATmega328
Oscilador	8 MHz
RTC	DS1337S
E/S lógicas	3.3V
Suministro de Energía	Batería LiPo 3.7V, o panel solar regulado a 5VDC
Conectividad	I <sup>2</sup> C, UART, SPI
Corriente en circuito abierto	6mA máx.
Corriente de carga	300mA
Tamaño del PCB	86.74mm x 60.96mm

Fuente: Extraída de [51].

En el caso de humedad relativa y temperatura ambiente se usa el sensor RTH03 (ver Figura 3.4). La salida ya se encuentra calibrada y se interpreta como valor analógico o digital (Tren de pulsos). La librería contiene la ecuación de linealidad y calibración con la que se procesa su señal. El sensor utiliza un bus MaxDetect para proporcionar tanto humedad como temperatura por la misma línea. En la Tabla 3.2 se muestran sus especificaciones.



Figura 3.4 Sensor RTH03.  
Fuente: Autores.

Tabla 3.2 Características RTH03.

Parámetro	Valor
Voltaje de alimentación	3.3-6V
Señal de salida	Digital
Rango de operación	0-100%RH y -40 a 80°C
Precisión	+2%RH y +0.5°C
Resolución	0.1%RH y 0.1°C

Fuente: Extraída de [52].

La temperatura y humedad ambiente se consigue aplicando Ec. 1 y Ec. 2:

$$^{\circ}\text{F to } ^{\circ}\text{C} = (T - 32) \times 0.55555 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$$T = \left( \frac{ADC0 \times 1023}{3.3} \right)$$

$$hi(\%) = 0.5 \times (T + 61 + ((T - 68) \times 1.2) + (\%H \times 0.094)) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$$\%H = \left( \frac{ADC1 \times 1023}{3.3} \right)$$

Para el acondicionamiento del sensor RTH03 sólo necesita un resistor de 4.7 o 10k ohmios (Pull-Up). En este caso se lee por el pin ADC1 y se lo compara interpretando la señal por un pin digital que soporta interrupciones como PD3 del MCU. En la Figura 3.5 se muestra el esquema de conexiones para el acondicionamiento del sensor RTH03 [53].

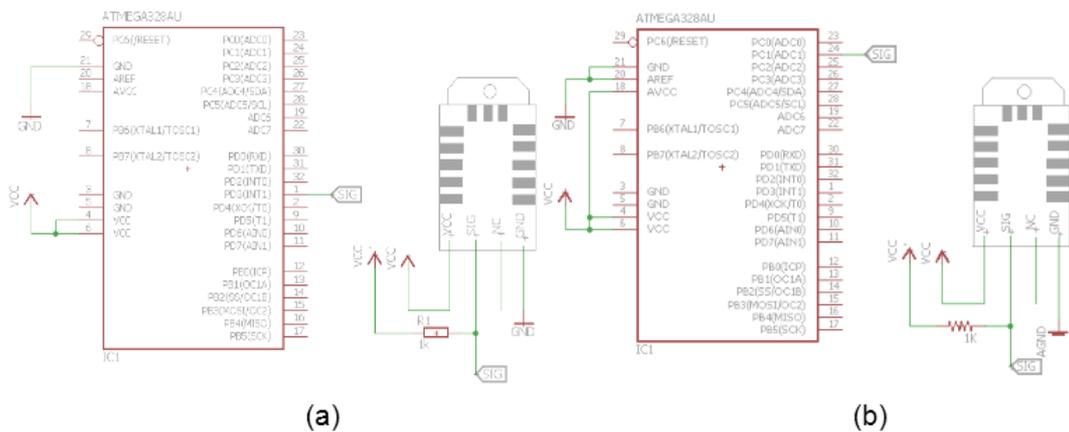


Figura 3.5 Esquema para la adquisición del sensor RTH03 a) ADC b) Digital (interrupciones). Fuente: Autores.

Para la obtención de las variables de temperatura y humedad del suelo se usa el sensor STH10. Un pequeño microcontrolador que procesa los valores obtenidos y los devuelve calibrados a través de una comunicación síncrona a dos cables. La sonda resultante la envuelve una malla de metal. El sensor posee cuatro líneas: VCC, GND, una salida digital de datos (data) y una entrada digital como reloj de sincronización (CLK). Como hardware adicional tenemos a un resistor de 10k ohmios entre la línea de datos a VCC. La conexión se muestra en la Figura 3.6.

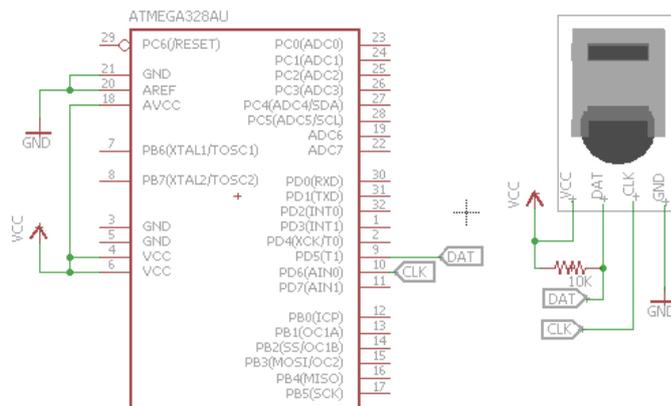


Figura 3.6 Diagrama de conexión sensor STH10.  
Fuente: Autores.

Con la Ec. 3 y Ec. 4 se obtiene la temperatura y humedad relativa del suelo.

$$T(^{\circ}\text{C}) = (t \times D2) + D1 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$$t = \text{data1}$$

$$D1 = -40$$

$$D2 = 0.01$$

$$\text{Humidity}(\%) = (T - 25) \times (T1 + T2 \times \text{val}) + C1 + C2 \times h + C3 \times h^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$$h = \text{data2}$$

$$C1 = -4.0$$

$$C2 = 0.0405$$

$$C3 = -0.0000028$$

$$T1 = 0.01$$

$$T2 = 0.00008$$

Las variables de presión atmosférica, humedad/temperatura en la placa se obtienen a partir del sensor MPL3115A2 y HTU21D respectivamente que se encuentran embebidos en la placa comercial "Weather Shield" donde se realiza el acondicionamiento de señal. Esta placa es compatible con el kit "Weather meters" de la marca Sparkfun que está compuesta por veleta de viento, anemómetro y pluviómetro (ver en la Figura 3.7).

Para determinar la temperatura y humedad de la placa se utiliza Ec. 5 y Ec. 6.

$$t = \text{data1 } I^2C$$

$$\text{temperatura } (^{\circ}\text{C}) = \left( \frac{t \times 175.72}{65536} \right) - 46.85 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$h = \text{data2 } I^2C$$

$$\text{humedad (\%)} = \left( \frac{h \times 125}{65536} \right) - 6 \quad (\text{Ec. 6})$$



Figura 3.7 Weather meters.  
Fuente: Autores.

Con este kit se obtienen las variables de velocidad y dirección de viento, y nivel de precipitaciones de acuerdo a Ec. 7 y Ec. 8. El esquema de conexión se aprecia en la Figura 3.8.

$\text{windClicks} = \text{interrupciones en D3, cada segundo} = 1.492\text{MPH}$

$\text{millis} = \text{tiempo en ms desde que se adquiere el valor}$

$$\text{windSpeed(MPH)} = \left( \frac{\text{windClicks} \times 1000}{\text{millis} - \text{lastWindCheck}} \right) \times 1.492 \quad \text{Ec. 7}$$

$$\text{WDIR} = \left( \frac{\text{ADC} \times 1023}{3.3} \right)$$

$$\text{windDir}(\text{°}) = 0.41 \times \text{WDIR} - 68.5 \quad \text{Ec. 8}$$

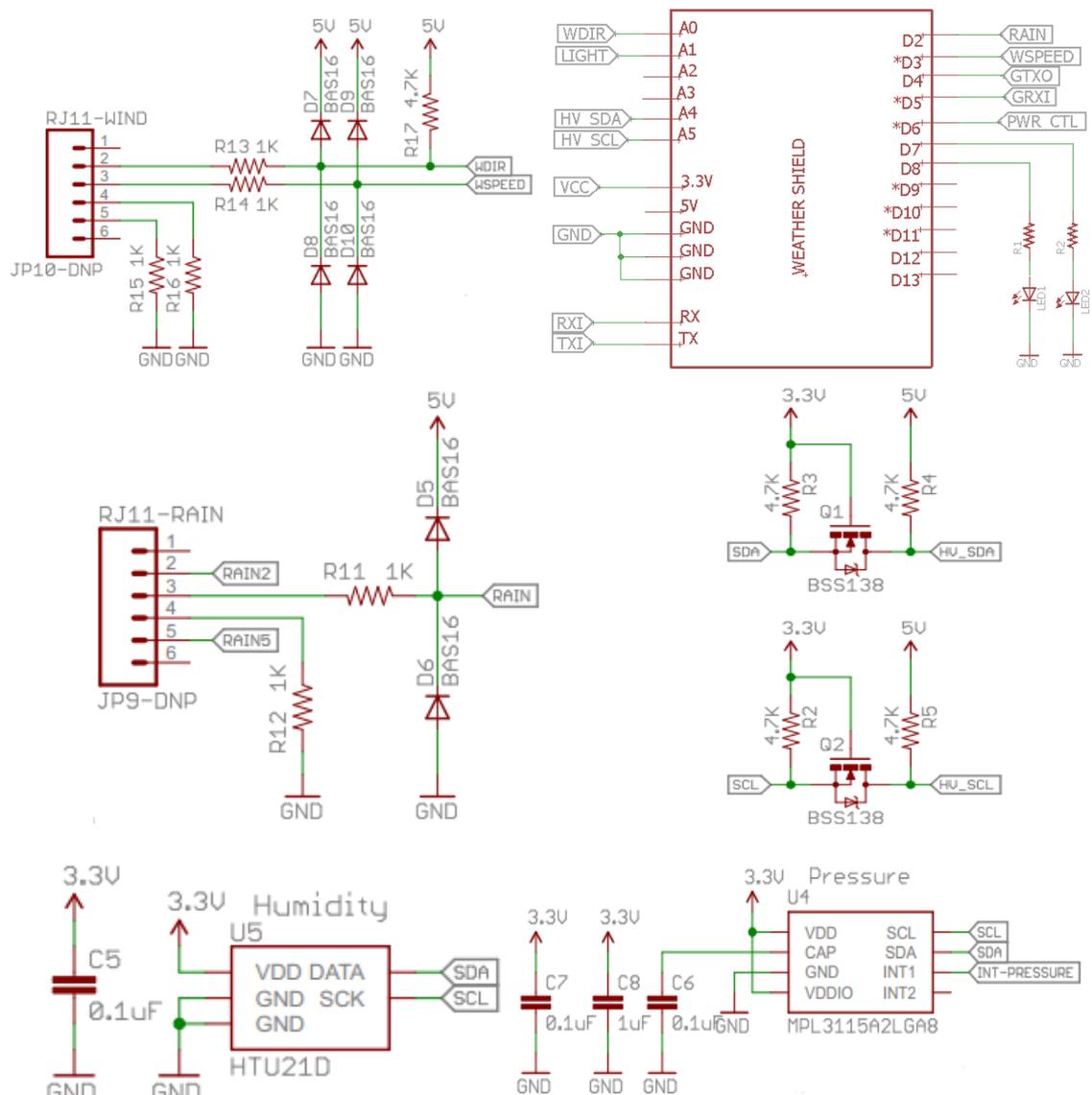


Figura 3.8 Weather Shield.  
Fuente: Extraída de [54].

Para el acondicionamiento de la variable porcentaje de batería, se requiere un circuito acoplador para restar dos tensiones con el fin de obtener la caída de tensión entre un voltaje de batería y el de alimentación. Adicionalmente resulta necesario contar con un voltaje de referencia que generalmente se conviene a 3.3V. El esquemático se muestra en la Figura 3.9.

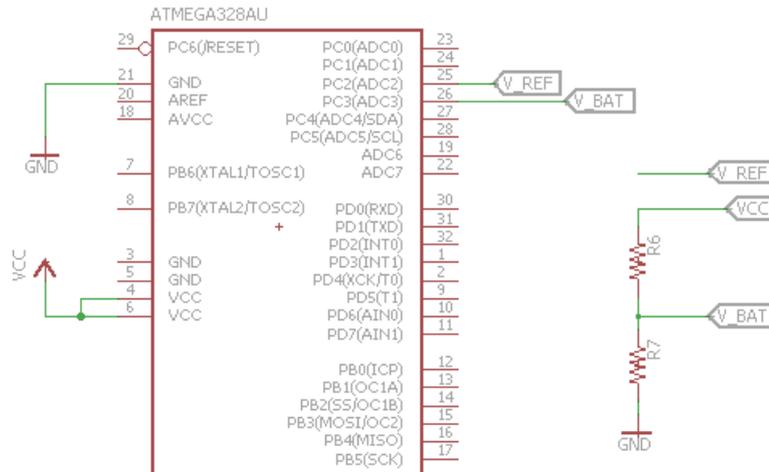


Figura 3.9 Acondicionamiento porcentaje de la batería.  
Fuente: Autores.

La ecuación para obtener el voltaje de batería según este esquema es:

$$\text{Voltaje batería} = \frac{3.3}{\text{Voltaje referencia}} * \text{voltaje Operación} * 4.9 \quad (\text{Ec. 9})$$

### 3.2.2 Software del nodo remoto.

#### 3.2.2.1 Firmware de obtención de variables meteorológicas del nodo remoto.

La medición, registro y análisis de variables meteorológicas crea el medio de partida para la aplicación de convergencia de tecnologías WSN y UAV seleccionada en este trabajo de titulación. Las variables meteorológicas obtenidas son:

- Temperatura (°C) y humedad relativa (%) ambiente.
- Temperatura (°C) y humedad relativa (%) del suelo.
- Temperatura (°C) y humedad relativa (%) de la placa.
- Presión barométrica (mbar y en función de la altitud).
- Velocidad (km/h) y dirección (°) de viento.
- Nivel de lluvia (mm/min).

La asignación de pines de cada variable se detalla en la Figura 3.10.

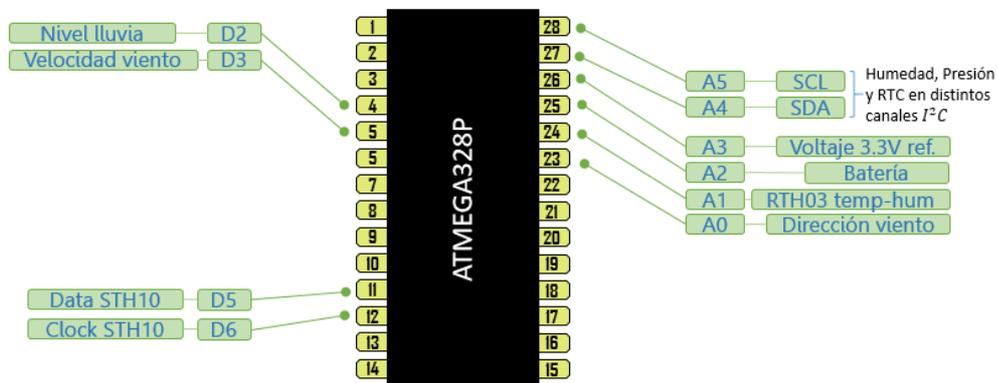


Figura 3.10 Asignación de entradas a variables específicas.  
Fuente: Autores.

A continuación, se describe las partes que conforman del diagrama de flujo para el algoritmo de adquisición de variables meteorológicas (ver Figura 3.11). En la parte declarativa se generaliza la inicialización de las variables a través del bloque: “Declaración de variables”.

En el proceso del algoritmo se asigna cuatro variables analógicas desde el ADC0 al ADC3. Cuatro variables digitales que soportan interrupciones (D2, D3, D5 y D6 del Atmega328P). Se usa además una comunicación I<sup>2</sup>C para adquirir presión barométrica, temperatura y humedad de placa (ADC4/SDA y ADC5/SCL del Atmega328P). Cada nodo remoto cuenta con un reloj en tiempo real (RTC) comunicado por el mismo bus I<sup>2</sup>C que viene embebido en la placa de desarrollo Seeeduno Stalker V3. De esta manera a cada trama se le incorpora fecha y hora exacta de su obtención (existen datos procesados que son el resultado de promedio de muestras).

Con las funciones *getTemperatureC()* y *getHumidity()* de la librería “DHT22.h” se consigue la temperatura y humedad ambiente. La humedad y temperatura del suelo se adquieren de los parámetros que devuelve la función *STH.measure()*. La humedad de la placa se consigue del sensor "HTU21D" con a librería del mismo nombre con la función *readHumidity()*. La temperatura de la placa se obtiene del sensor "MPL3115A2" con la función *readTemF()* se requiere de conversión a escala centígrada. La presión barométrica *readPressure()* se consigue del sensor anterior con la ecuación derivada de la guía de conexión de la placa Weather Shield *Ec. 10* en [55]. Nótese que está en función de la altitud donde se coloque el nodo remoto.

$$P\_mbar = 0.98 * readPressure() * \left( 1 + \frac{8.42^{-5} (readPressure() - 0.3)^{0.19}}{Altitud} \right)^{5.26} \quad (Ec. 10)$$

El nivel de lluvia depende del evento que se lee cada 10ms y equivale a 0.2794mm de agua. La velocidad de viento es tomada en instantes de 750ms. El porcentaje de batería se logra comparando las entradas analógicas de nivel de batería y voltaje 3.3V.

Por último, el envío de tramas se da con el subproceso *TRANSMISION 0x10()* que llama los valores captados y los unifica en una cadena de caracteres (Payload). Se prevé enviar 6 tramas correspondientes a 1 hora de datos tomados, dado que cada 10 minutos se adquiere muestras de las variables. A ese ritmo, en 8 horas útiles al día se debe contar con 24 tramas de cada nodo remoto. Bajo estos términos el nodo remoto mantiene una sincronía temporal con el nodo móvil.

El porcentaje de procesamiento requerido para cada nodo remoto es de 60% y 50% de memoria dinámica, lo cual resulta óptimo al no exceder el 85% y 75% respectivamente. Es decir, de los 32kB de memoria flash que posee el ATmega328p 19,2kB están ocupados y de los 2kB de memoria SRAM 1kB está ocupado.

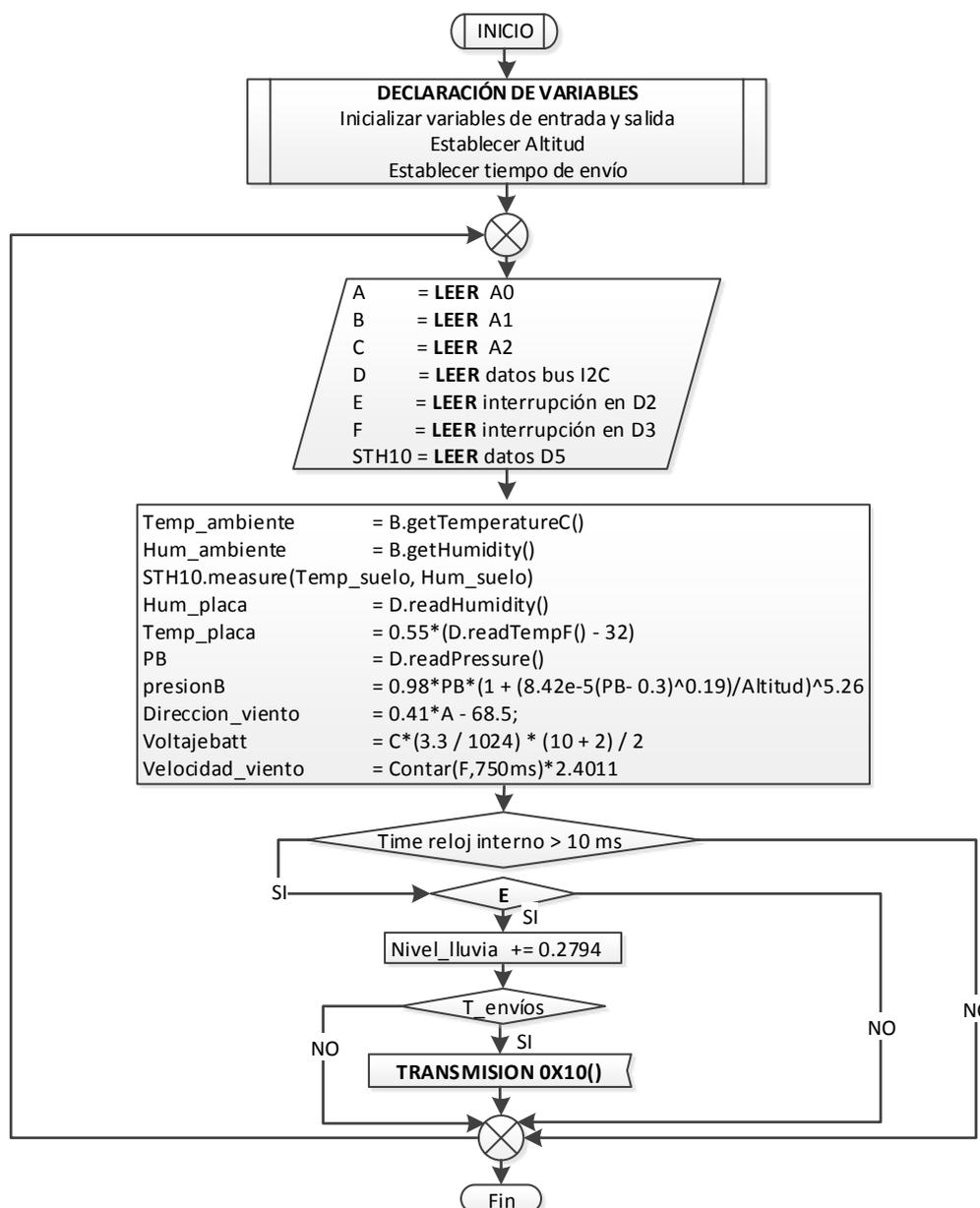


Figura 3.11 Diagrama de flujo para la obtención y procesamiento de señales del nodo remoto.  
Fuente: Autores.

Para el envío de información en modo API ZigBee en formato (0x10) o “Transmit Request” se siguió el diagrama de flujo de la Figura 3.12. En éste se observa que se habilita un socket ZigBee donde se define: dirección MAC larga y corta del dispositivo remoto a enlazar. Resulta una conexión multipunto a punto, donde cada nodo remoto posee la dirección MAC del nodo móvil. El envío de las variables se lo realiza separándolos por punto y coma (“;”) para que al

ser recolectados sean procesados y guardados directamente. No se considera ciclos de sueño (sleep mode) y el tiempo de envío puede modificarse a requerimiento del usuario.

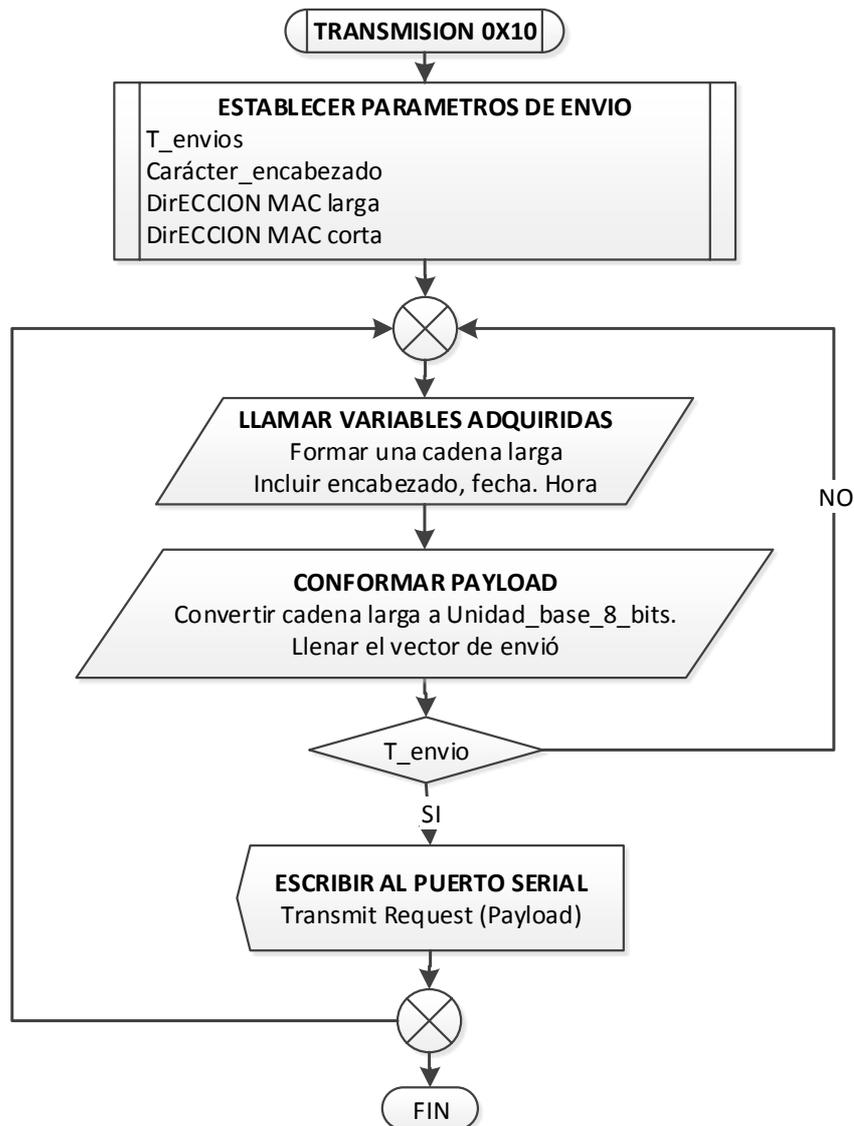


Figura 3.12 Diagrama de flujo que gestiona el envío de datos.  
Fuente: Autores.

### 3.3 Nodo móvil

Es el medio de pasarela o transporte de datos. Los datos se replican instantáneamente desde el nodo remoto en el nodo base a través de dos pares de enlaces inalámbricos punto a punto (cuando el nodo móvil está en modo REPDAT). Y son cargados desde el nodo remoto y transportados hasta la estación base donde se descargan por medios alámbricos (interfaz UART-USB) o inalámbricos (enlace ZigBee) cuando el nodo móvil se encuentra en modo RECDAT.

### 3.3.1 Hardware.

#### 3.3.1.1 Hardware del recolector de datos.

El hardware que formará parte del módulo RECDAT y que se encuentra embebido en la placa PCB se lo ha dividido en 4 etapas.

- ✓ Etapa de captación (datos ZigBee y GPS) y reenvío de datos.
- ✓ Etapa de procesamiento de datos.
- ✓ Etapa de almacenamiento.
- ✓ Etapa de alimentación.

##### 3.3.1.1.1 Etapa de captación y reenvío de datos.

En esta etapa se emplean dos módulos XBee S2. El primero capta la señal (datos) proveniente del nodo terrestre en el proceso de carga. Con el segundo se retransmite la señal de RF correspondiente al proceso de descarga de datos desde el nodo móvil hasta el nodo estación base. Cada módulo se comunica por una interfaz UART (ver Figura 3.13).

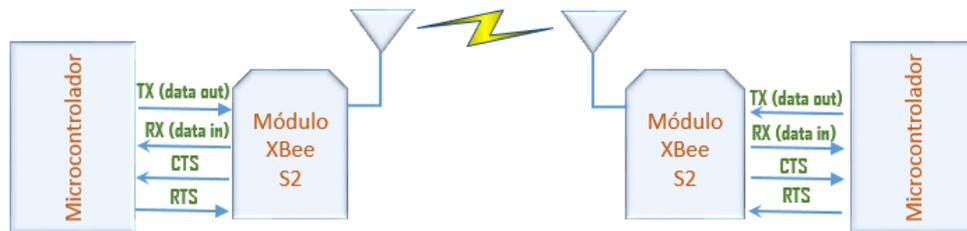


Figura 3.13 Diagrama de flujo de datos del sistema en un entorno de interfaz UART. Fuente: Extraída de [56].

Es necesario un puerto extra a parte del nativo. De esta manera se obtienen los datos del primer módulo por un puerto serial software creado a partir de pines digitales (D8 y D9), y se retransmite por otro modulo a través del puerto serial nativo del microcontrolador. El esquema de conexión implementado se puede ver en la Figura 3.14.

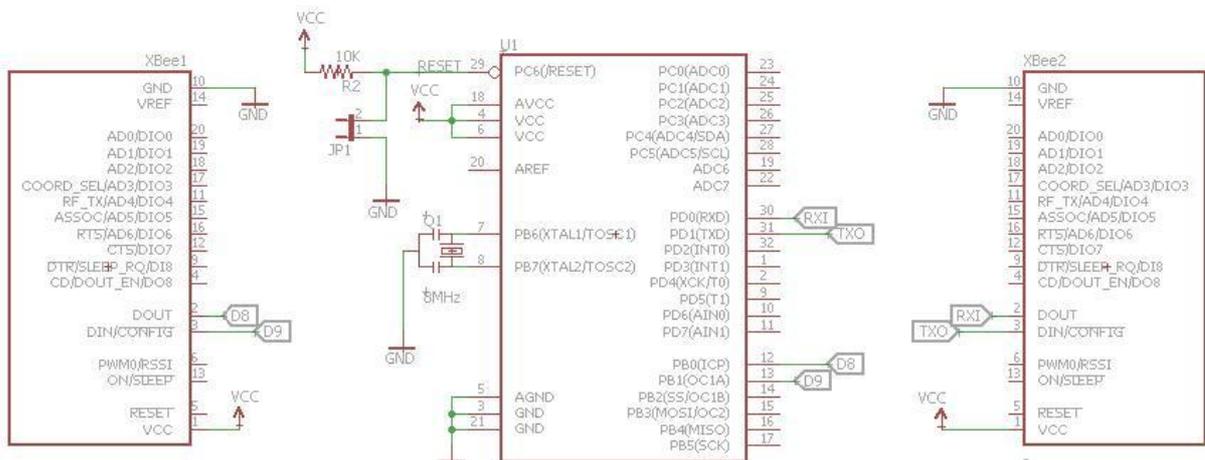


Figura 3.14 Esquema de conexión entre los módulos de comunicación XBee y el microcontrolador. Fuente: Autores.

Para conseguir datos de geolocalización del nodo móvil se emplea un módulo GPS modelo GP-635T. Las especificaciones del módulo se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Especificaciones GPS/GP-635T.

Característica	Especificación
Interface de comunicación (9600 baudios)	USB/UART-TTL
Consumo (mA)	56
Voltaje de alimentación(V)	3.3 - 5.5 TTL
Sensibilidad del Receptor (dBm)	Seguimiento: -161; Adquisición: -147
Max. Altitud (m)	< 50.000
Max. Velocidad (km/h)	< 1.852
Mensajes de salida (Estándar NMEA)	GPGLL, GPGGA
Dimensiones (mm)	35 x 8 x 6.55

Fuente: Extraída de [57].

### 3.3.1.1.2 Etapa de procesamiento de información.

Encargada específicamente de la carga y descarga de datos. Interpretará la orden de escritura y de extracción (lectura) de la etapa de almacenamiento por medio del “firmware de RECDAT”. Su esquema de conexión se presenta en la Figura 3.15.

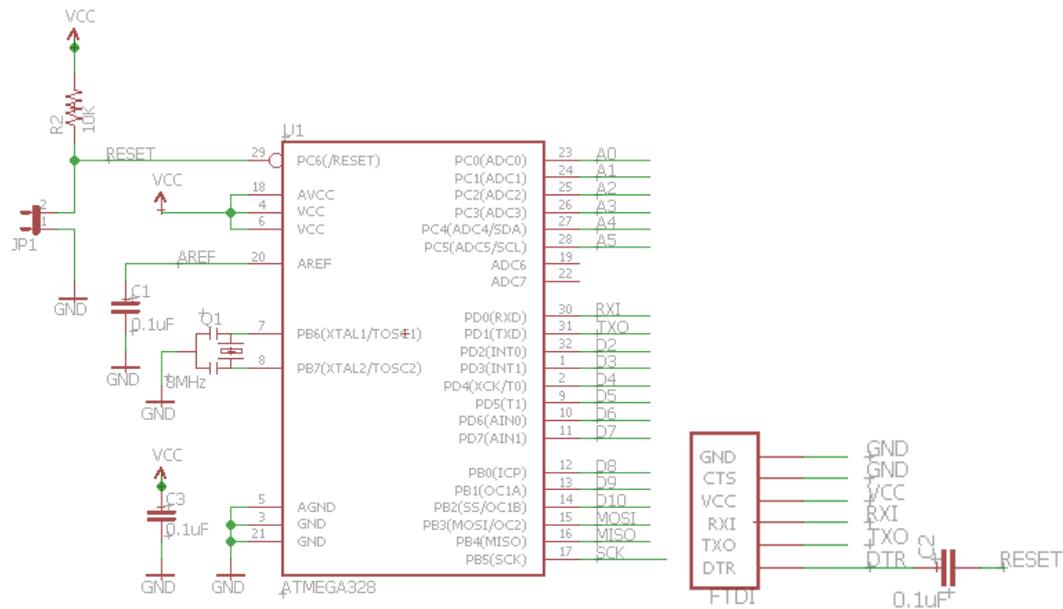


Figura 3.15 Esquema del sistema de procesamiento de información.  
Fuente: Autores.

Para programar se aprovecha la versatilidad de esta interfaz FTDI UartSBee V4 (ver Figura 3.16) que sirve además como explorador de módulos tipo Bee.

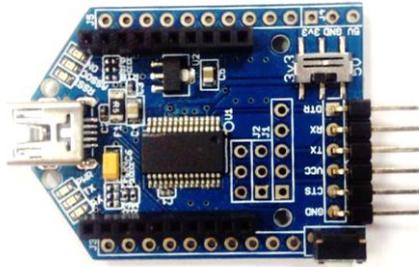


Figura 3.16 UartSBee V4 (gateway USB-Xbee-TTL).  
Fuente: Autores.

### 3.3.1.1.3 Etapa de almacenamiento.

La electrónica que precede esta etapa se trata de una sencilla conexión por interfaz SPI por medio de resistores de 10k ohmios para realizar el Pull-Up (ver Figura 3.17). Evidentemente se utilizará la SD en modo SPI.

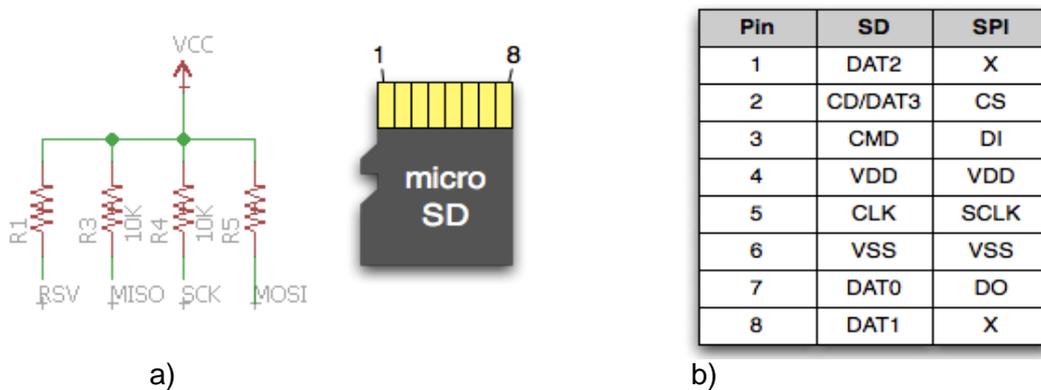


Figura 3.17 a) Esquema de conexión micro SD. b) Diagrama de pines.  
Fuente: Extraída de [58].

Se le añade una pequeña fase de filtrado de voltaje de alimentación (ver Figura 3.18) que mejora el mantenimiento de la vida útil del dispositivo de almacenamiento

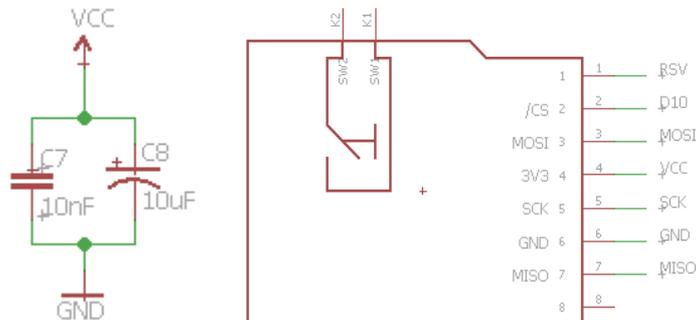


Figura 3.18 Fase de filtrado de alimentación de micro SD.  
Fuente: Autores.

El formato de datos y la frecuencia de lectura/escritura influyen en la vida útil de la tarjeta micro SD. Se recomienda realizar un formateo (borrado) periódico con el fin de llevar un registro

actualizado y detectarse problemas de escritura al incluirse caracteres extraños o saltos de línea. Se propone un programa de almacenamiento en función al envío de datos del nodo remoto. Además se sigue la recomendación de obtener puntos de medición por cada 10 minutos con el fin de no evadir algún evento relevante [59]. De esta manera se asume 5 nodos remotos en la topología de red, cada uno de ellos envía 6 tramas de 120 caracteres de la última hora de adquisición. En el caso de REPDAT no se requiere almacenarlos tramas ya que se retransmiten al instantate de subirse.

Los datos se cargan mientras pasa el nodo móvil UAV sobrevuela por el área de cobertura de los nodos remotos. No se considera suspender al UAV.

En el sistema RECDAT se almacena tramas de distintos nodos en un archivo que se descargará en el nodo estación base. Para asegurar el éxito en la recepción de tramas se hace envíos periodicos de las 6 tramas de la última hora.

Calculando, se logra 6 tramas/hora/nodo y en 5 nodos remotos 30 tramas/hora/nodos. Un archivo .csv de 30 tramas pesa alrededor de 4kB. En 24 horas se almacenan 720 tramas o 96kB (por día). La micro SD tiene una capacidad de 2GB. De la ecuación Ec.11 se deduce improbable saturar la tarjeta.

$$P_a = \frac{C_{nSD}}{365 \times C_r} \quad (Ec. 11)$$

En dónde:

$P_a$ , es el periodo de almacenamiento, años.

$C_{nSD}$ , es la capacidad nominal de almacenamiento, GB.

$C_r$ , es la capacidad requerida de almacenamiento por día, kB/día.

$$P_a = \frac{2000000000}{365 \times 32000 \text{ día}}$$

$$P_a = \frac{2000000}{\frac{11680}{\text{año}}} \approx 57 \text{ años}$$

#### 3.3.1.1.4 Consumo de corriente.

Partiendo de las especificaciones del regulador AZ1117T (ver anexo C) existe una diferencia de 2V entre el voltaje de salida y el voltaje de entrada, es decir es necesario contar con una fuente de al menos 5.3V para trabajar a un nivel TTL 3.3V. Las baterías recargables comerciales proporcionan voltaje por celdas de 3.7V (4.1V en plena carga). Dispuestas en serie, 2 de estas se consigue 7.4V suficiente para alimentar el sistema.

El tamaño de la batería respecto a su capacidad resulta crítico frente a un equipo que debe permanecer en el (la autonomía limitada). Para lograr trabajar con una sola batería se opta cambiar de regulador de voltaje (DC-DC). Así se arma una etapa de regulación basado en el integrado MIC5203-3.3BM5. El voltaje operativo de este regulador se encuentra entre 1.0V a 16V y la relación de regulación está dada en Ec. 12.

$$V_{in} = V_{out} + 1 V \quad (Ec. 12)$$

En dónde:

$V_{in}$ , es el voltaje de entrada al regulador, V.

$V_{out}$ , es el voltaje de salida regulada, V.

En base a pruebas de laboratorio la etapa de mayor consumo es la de comunicación. Esta se mantiene operativa hasta 2,5V de alimentación. Lo que quiere decir que para mantenernos transmitiendo, el voltaje de batería no debe descargarse por debajo de los 3,5V (2,5V luego de la etapa de regulación). El rango de uso sería entre 3,5V a 4,1V. En la Figura 3.19 se muestra el esquema de la fuente de alimentación del prototipo.

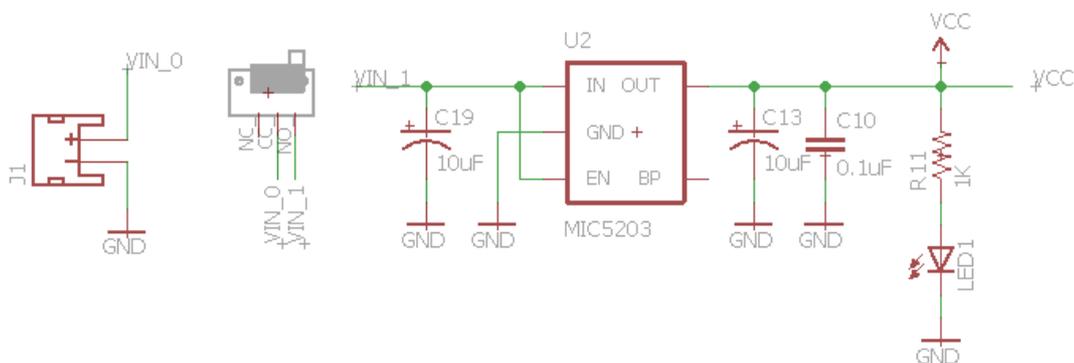


Figura 3.19 Fuente de alimentación del prototipo.  
Fuente: Autores.

El hardware del nodo móvil incorpora una batería de Polímero de Litio (LiPo) de 2300mAh (ver Figura 3.20). Su tamaño 50mm x 34mm x 12mm respecto a su peso (47,78g) y capacidad, resulta más ligera y eficiente en comparación a una de Iones de Litio con misma capacidad, pero por las propiedades físicas del material resultan más pesadas [60].

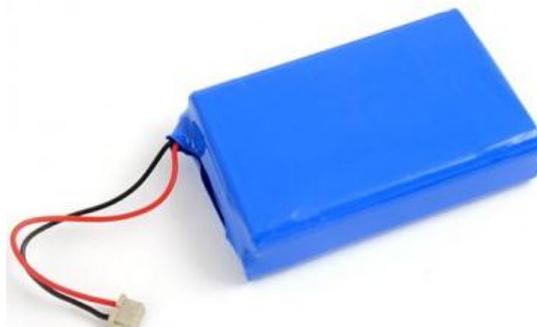


Figura 3.20 Batería de LiPo.  
Fuente: Autores.

Al hacer el cálculo de la batería requerida en el sistema RECDAT. El consumo  $I_r$  al recibir datos es de 147mA. Cuando se efectúa el requerimiento de descarga de datos la corriente  $I_q$  asciende a 155mA (ver Figura 3.21). Se calcula para 155mA.

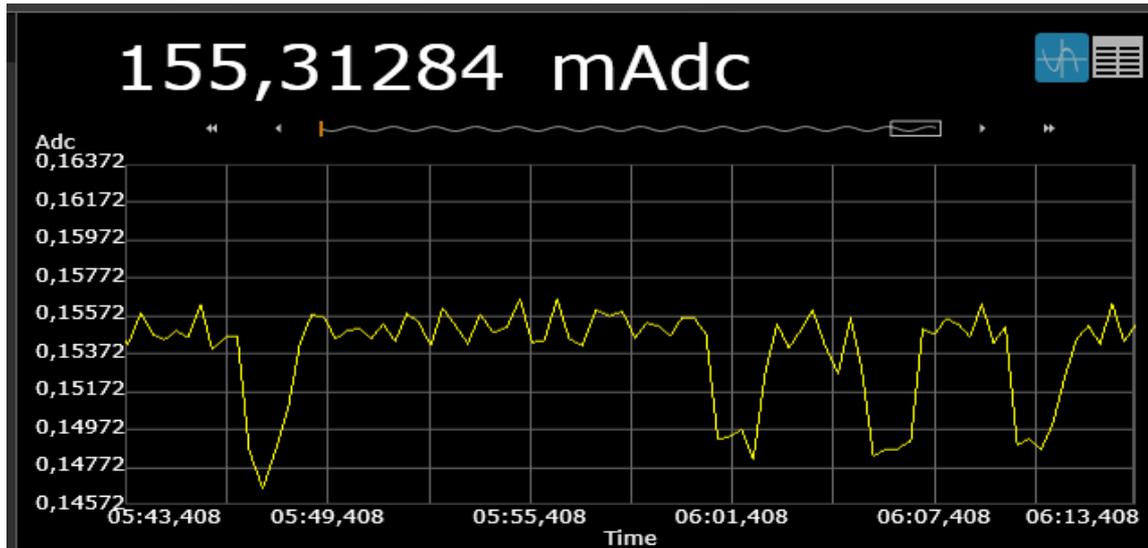


Figura 3.21 Consumo de corriente en RECDAT.  
Fuente: Autores.

No se considera dormir el equipo, únicamente se concibe la lógica necesaria para receptor o retransmitir de acuerdo al caso. Cuando el sistema se encuentre en la estación base el consumo es 0mA, dado que el equipo está inactivo (apagado). El tiempo de actividad ( $T_{on}$ ) será de 10 minutos por hora cuando el UAV se mantiene volando, los otros 50 minutos permanecerá inactivo ( $T_{off}$ ).

$$\text{El consumo } C_d = \frac{T_{on} \times I_r + T_{off} \times I_{off}}{T_{on} + T_{off}} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$C_d = \frac{10 \times 155 + 50 \times 0}{60}$$

$$C_d \approx 26 \text{ mA}$$

Si la capacidad nominal de la batería es 2300mAh. La recomendación dada en [61] menciona la importancia de trabajar del 60 al 80% de profundidad de descarga para mantener la vida útil de la batería. Tomando el peor caso, la vida útil de la batería está dada por Ec.14:

$$C_u = C_n \times PD_{m\acute{a}x} \quad (\text{Ec. 14})$$

En dónde:

$V_u$ , es la vida de utilidad de la batería, h.

$C_n$ , es la capacidad nominal de la batería, mAh.

$C_d$ , es el consumo del dispositivo, mA.

$PD_{m\acute{a}x}$ , es la profundidad máxima de descarga de la batería, %.

$$Vu = \frac{2300}{26} \times 0,6 \sim 53h$$

Con esta batería se consigue una autonomía de 53 despliegues. Es decir 53 horas (horario) o 53 días (diario). En la Figura 3.22 se ve el consumo de corriente de cada componente del nodo móvil en modo RECDAT.

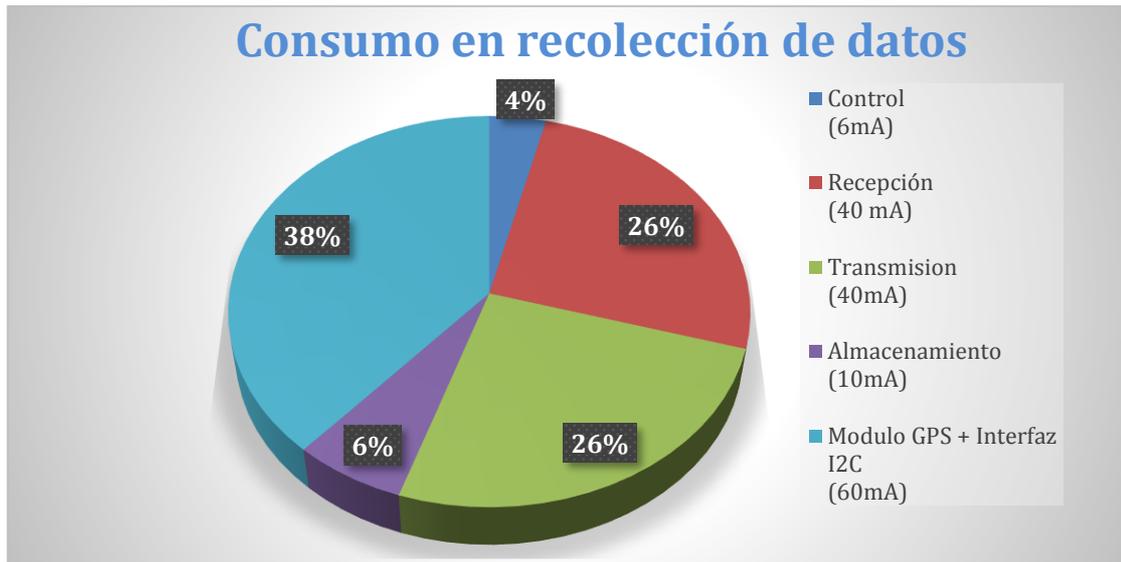


Figura 3.22 Consumo para el nodo móvil en modo recolector.  
Fuente: Autores.

### 3.3.1.2 Hardware del repetidor de datos

Se evalúa dos posibles opciones de hardware. El primero consta de un único módulo XBee24 S2 en modo Router ZigBee. Aquí únicamente se requiere alimentar y el equipo se encarga de encaminar datos entre nodo remoto a base. Pero no se ejerce control alguno sobre el flujo de datos. En cuanto a la segunda opción, resulta conveniente dado que se maneja el hardware presente para la arquitectura RECDAT (obviando la etapa de almacenamiento). Se requiere de 2 módulos de comunicación XBee-S2.

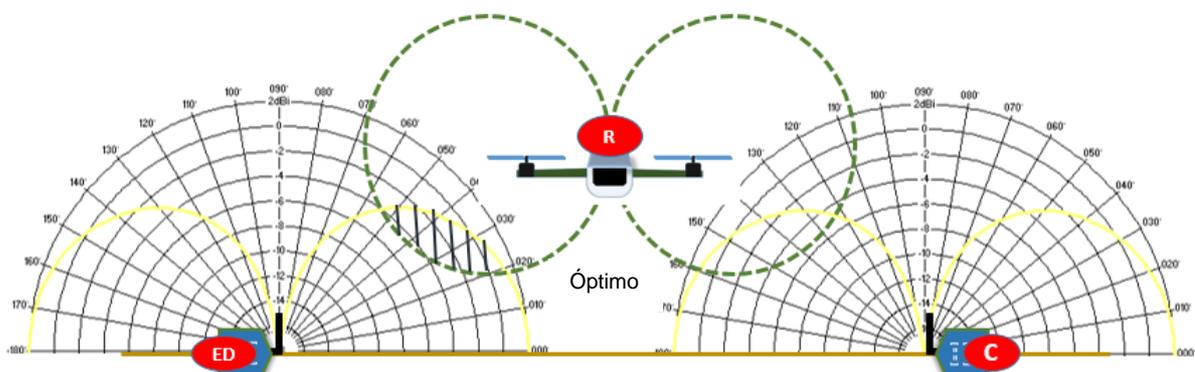


Figura 3.23 Bosquejo de enlace en una arquitectura de repetición de datos.  
Fuente: Autores.

En la Figura 3.23 se presenta el caso probado para la arquitectura REPDAT. Aunque no es la configuración más óptima puesto que es evidente que no se aprovecha toda la energía radiada. En esta ilustración se considera al terreno totalmente plano por lo que a la hora de ejecutar la prueba no se precisa un ángulo de elevación de antenas ya que ningún escenario prestaría tal condición. La elevación de la antena es 0° y la altura de vuelo se ve afecta por cuanto debe haber intersección entre lóbulos de radiación. La polarización es horizontal en los tres casos. El nodo móvil debe mantenerse horizontal para que no se dé desalineación en la dirección de polarización y se coincida con la dirección de mayor radiación.

### 3.3.1.2.1 Consumo de corriente.

Como la retransmisión es contigua a la recepción de tramas no se considera dormir el sistema. Aquí se elimina el almacenamiento o datalogging (10mA). Así el consumo de corriente  $I_r$  en REPDAT es de 145mA. El tiempo de actividad del nodo móvil es de 10min  $T_{on}$  y concuerda con la autonomía del UAV. El tiempo de inactividad  $T_{off}$  es 50min. Durante 10 minutos el nodo remoto envía datos, de esta manera:

$$\text{El consumo } C_d = \frac{T_{on} \times I_r + T_{off} \times I_d}{T_{on} + T_{off}} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\text{El consumo } C_d = \frac{10 \times 145 + 50 \times 0}{60}$$

$$C_d = 24,16 \text{ mA}$$

Por lo que se obtiene:

$$V_u = \frac{2300}{24} \times 0,6 \sim 57h$$

En la Figura 3.24 se detalla el consumo de los componentes del sistema REPDAT.

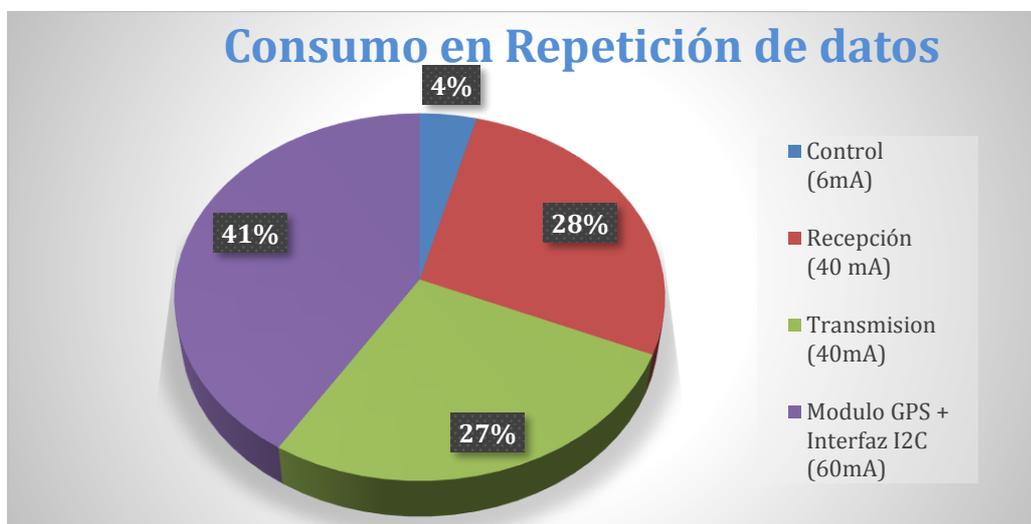
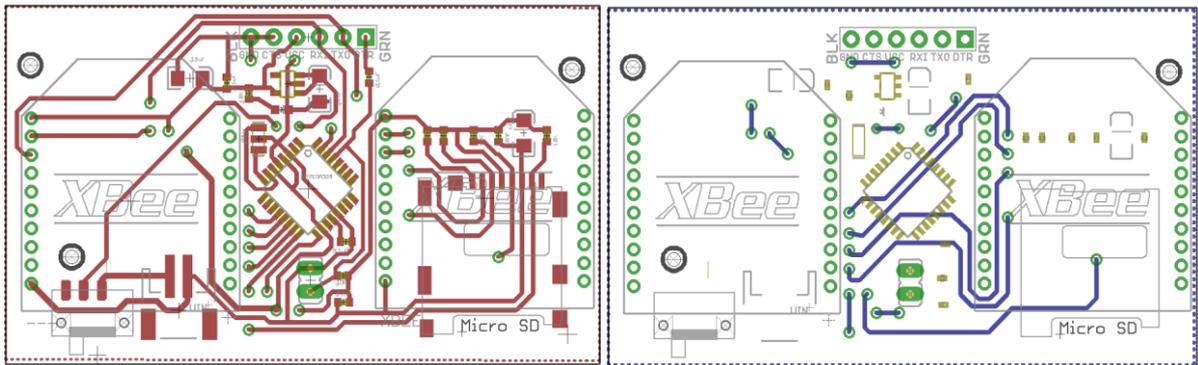
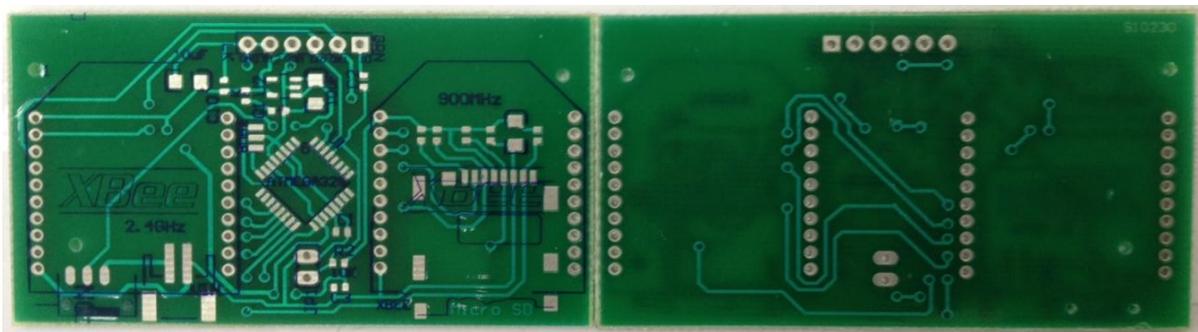


Figura 3.24 Consumo para el nodo móvil en modo repetidor.  
Fuente: Autores.

Con todo lo expuesto en la sección 3.3.1.1 y 3.3.1.2 se muestra el diseño del PCB y la placa final del prototipo implementado (ver Figura 3.25).



a)



b)



c)

Figura 3.25 a) Esquema de conexión b) Diseño PCB c) Integración de componentes.  
Fuente: Autores.

### **3.3.2 Firmware.**

#### **3.3.2.1 Firmware para la arquitectura RECDAT.**

Para poder realizar este algoritmo se creyó necesario separar las partes implícitas que conforman el mismo. Así se mostrarán los diagramas de flujo implementados para escritura/lectura a través de un microcontrolador de una tarjeta micro SD (para el almacenamiento de tramas enviadas al recolector), para realizar una transmisión en modo API sea recepción y retransmisión tras un requerimiento aperiódico del usuario. Estos algoritmos están adaptados frente a las facilidades de las librerías para el efecto.

Por lo general una trama 0x10 ZigBee está conformada por un delimitador de inicio (7E), la longitud de la trama a enviar por RF, el tipo de frame (10 en Tx), una dirección IEEE destinatario (de 64bits), una dirección corta destinatario de 16 bits (FFFE significa que no se conoce el dispositivo), radio de difusión (00 o desconocido), y el checksum. En una trama de recepción o 0x90 se identifica las opciones: delimitador, longitud, tipo de Frame (90), dirección destino, una dirección corta que ahora es conocida, una respuesta al comando remoto y un checksum (ver Figura 3.26).

<b>Start delimiter</b>	7E						
<b>Length</b>	00 12 (18)						
<b>Frame type</b>	10 (Transmit Request)						
<b>Frame ID</b>	01 (1)						
<b>64-bit dest. address</b>	00 13 A2 00 40 55 93 53						
<b>16-bit dest. address</b>	FF FE						
<b>Broadcast radius</b>	00 (0)						
<b>Options</b>	00						
<b>RF data</b>	<table border="1"> <tr><td>ASCII</td><td>HEX</td><td></td></tr> <tr><td>68</td><td>6F</td><td>6C 61</td></tr> </table>	ASCII	HEX		68	6F	6C 61
ASCII	HEX						
68	6F	6C 61					
<b>Checksum</b>	1D						

(a)

<b>Start delimiter</b>	7E						
<b>Length</b>	00 38 (56)						
<b>Frame type</b>	90 (Receive Packet)						
<b>64-bit source address</b>	00 13 A2 00 40 55 93 53						
<b>16-bit source address</b>	D8 78						
<b>Receive options</b>	01						
<b>RF data</b>	<table border="1"> <tr><td>ASCII</td><td>HEX</td><td></td></tr> <tr><td colspan="3">520.7;64.0;0.0;0.0;63.5;20.6;879.1;0.4;1;90</td></tr> </table>	ASCII	HEX		520.7;64.0;0.0;0.0;63.5;20.6;879.1;0.4;1;90		
ASCII	HEX						
520.7;64.0;0.0;0.0;63.5;20.6;879.1;0.4;1;90							
<b>Checksum</b>	36						

(b)

Figura 3.26 Trama ZigBee 0x10. a) Frame transmitido. b) Frame recibido.  
Fuente: Autores.

Al usar una transmisión bajo entramado de datos es necesario evaluarlos con el fin de excluir caracteres extraños o tramas cortadas. En la curva de la Figura 3.27 se muestra el número de tramas API cargadas en función del tiempo, de acuerdo a la prueba de laboratorio 3, en 1s se avanzan en cargar 3 tramas.



Figura 3.27 Curva de carga (subida) de datos al nodo móvil en modo API.  
Fuente: Autores.

La Figura 3.28 muestra el diagrama de flujo para la evaluación de tramas de llegada.

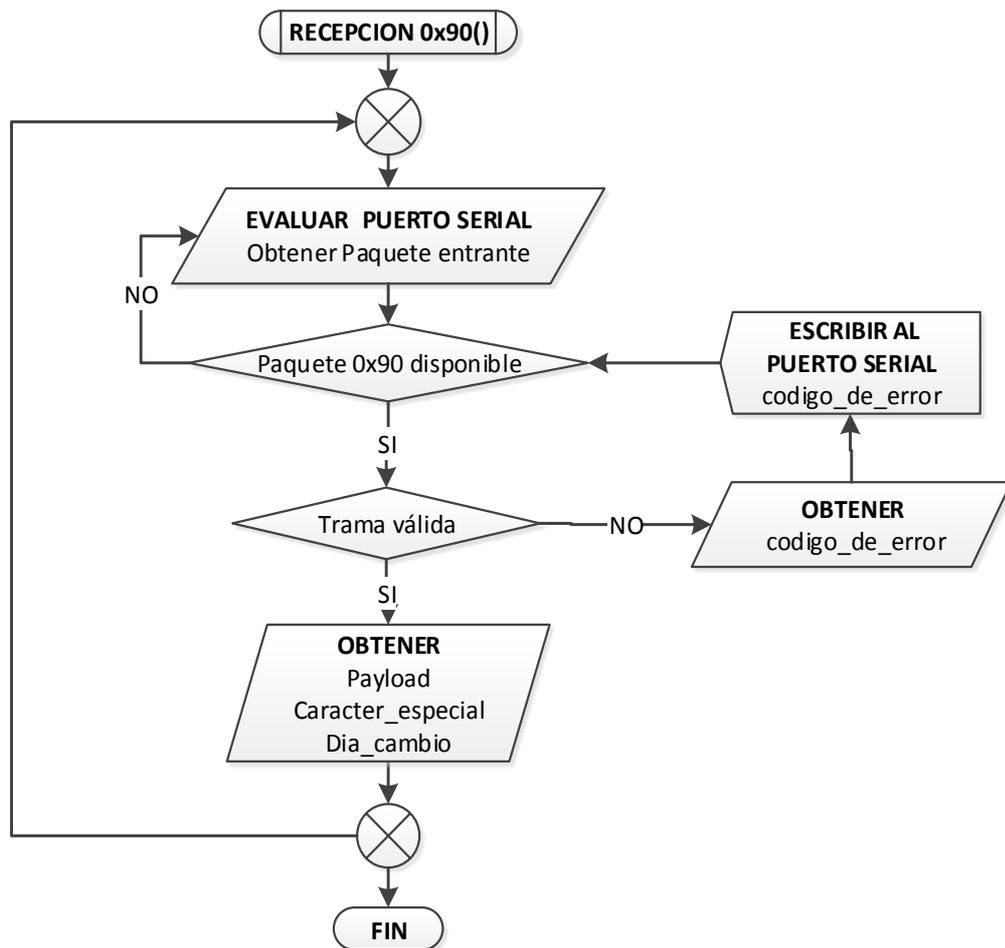


Figura 3.28 Diagrama de flujo para la recepción de trama API (0x90) ZigBee.  
Fuente: Autores.

Una trama es válida únicamente cuando al extraer del paquete entrante su ID y checksum son válidas. Otras causas para anular una trama según [62] son:

- ✓ Código de error: 1 El checksum falló (CHECKSUM\_FAILURE)
- ✓ Código de error: 2 Payload mal dimensionado (PACKET\_EXCEEDS\_BYTE\_ARRAY\_LENGTH)
- ✓ Código de error: 3 Carácter de inicio inesperado (UNEXPECTED\_START\_BYTE)

Para la obtención del nivel de señal o RSSI hay dos formas. La primera implica la lectura del pin 6 del XBee, donde hay que obtener niveles PWM y hacer el cambio a dBm. La segunda manera es comunicarse por comandos AT con el módulo para obtener el nivel de señal. El comando AT\_DB (ver anexo B) proporciona el nivel de señal del último paquete recibido. En este trabajo se opta por la segunda manera. En la Figura 3.29 se muestra el algoritmo implementado para la obtención del RSSI.

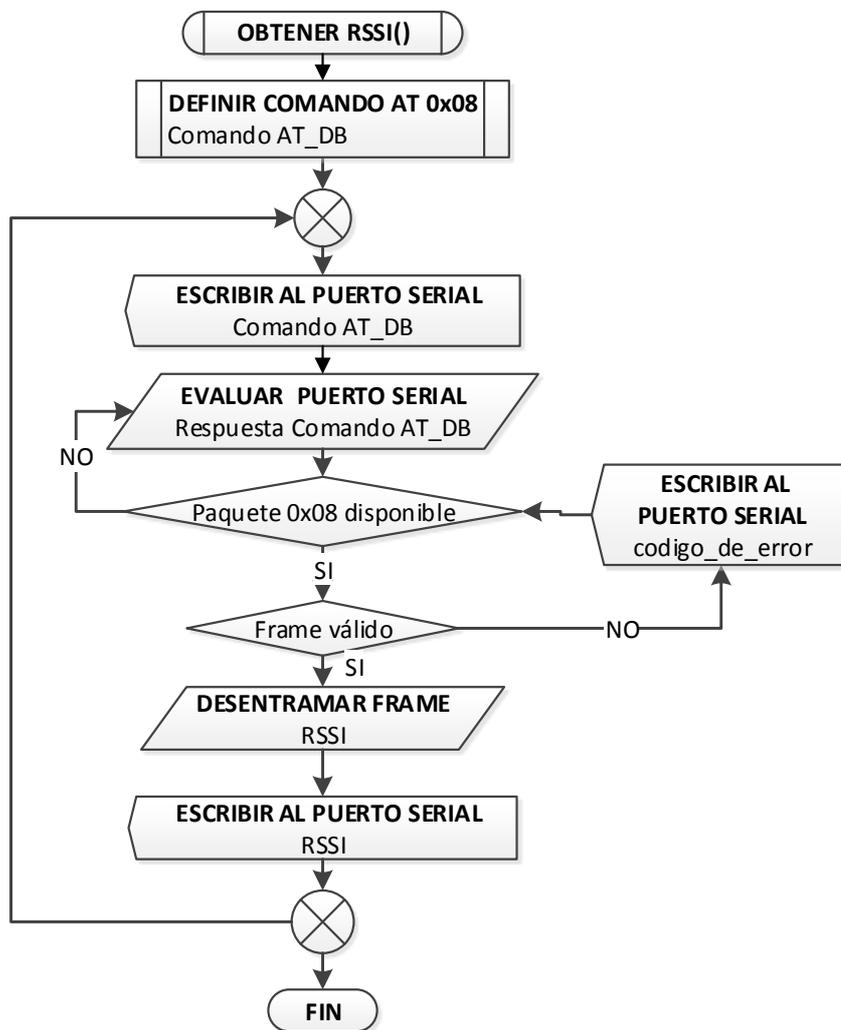


Figura 3.29 Diagrama de flujo para la obtención del nivel de señal RSSI por comando AT\_DB en una trama 0x08.  
Fuente: Autores.

El subproceso *EXTRACCION()* se utiliza únicamente en el firmware RECDAT. Al evaluarse en puerto serial los caracteres "\$#" representaría el requerimiento de extracción de datos de la micro SD. Es decir, para obtener los datos inalámbricamente de la estación móvil (ver Figura 3.30).

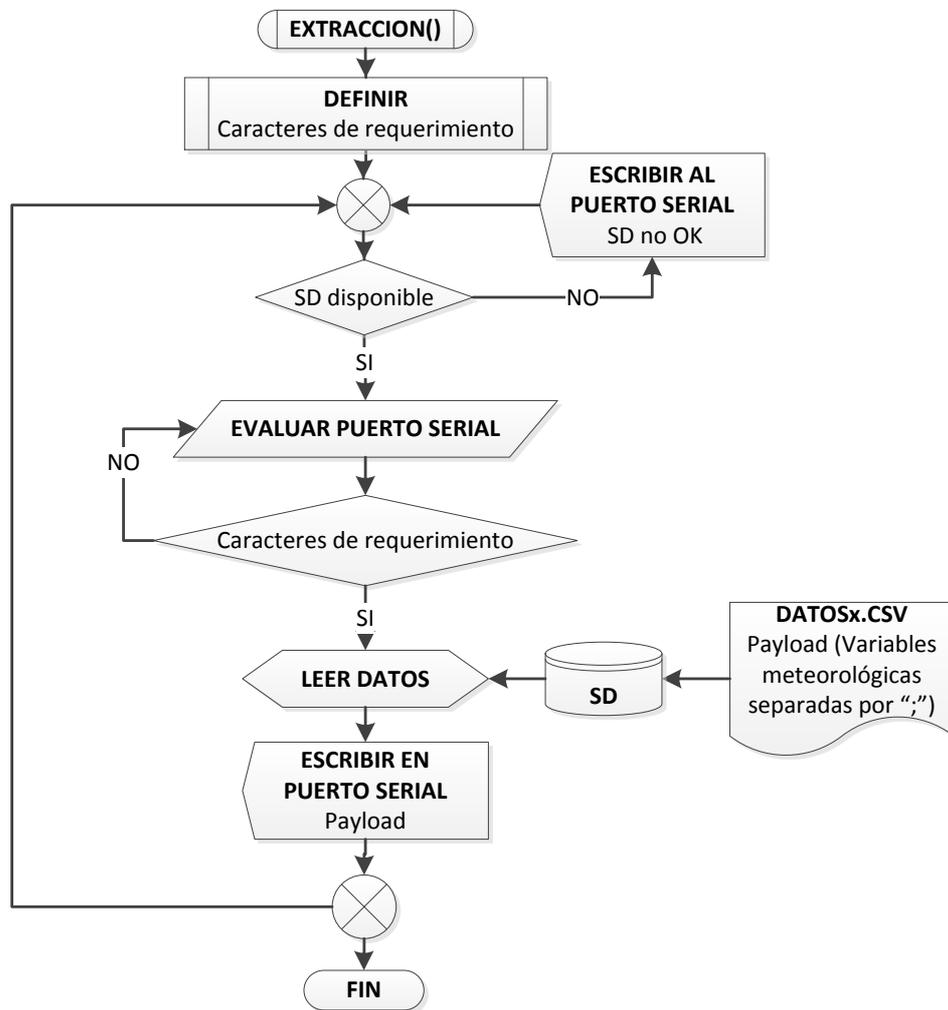


Figura 3.30 Diagrama de flujo para la extracción de datos recolectados.  
Fuente: Autores.

Tras la llegada de la trama de variables se añade valores de geolocalización GPS y el nivel de señal (RSSI) de este último paquete recibido. Es eficiente en términos de administración de datos el formato CSV (Valores Separados por Comas) para guardar o extraer información de una micro SD (previamente formateada en FAT32). Dicho formato permite gestionar datos por filas o columnas según sea la necesidad.

La Figura 3.31 representa el diagrama de flujo para almacenamiento de tramas entrantes al nodo móvil, en este algoritmo se define un periodo en el que la memoria será formateada con el fin de llevar controles reiterados. Los datos son almacenados dependiendo de la llegada de un carácter especial presente a la trama entrante y corresponde a "#".

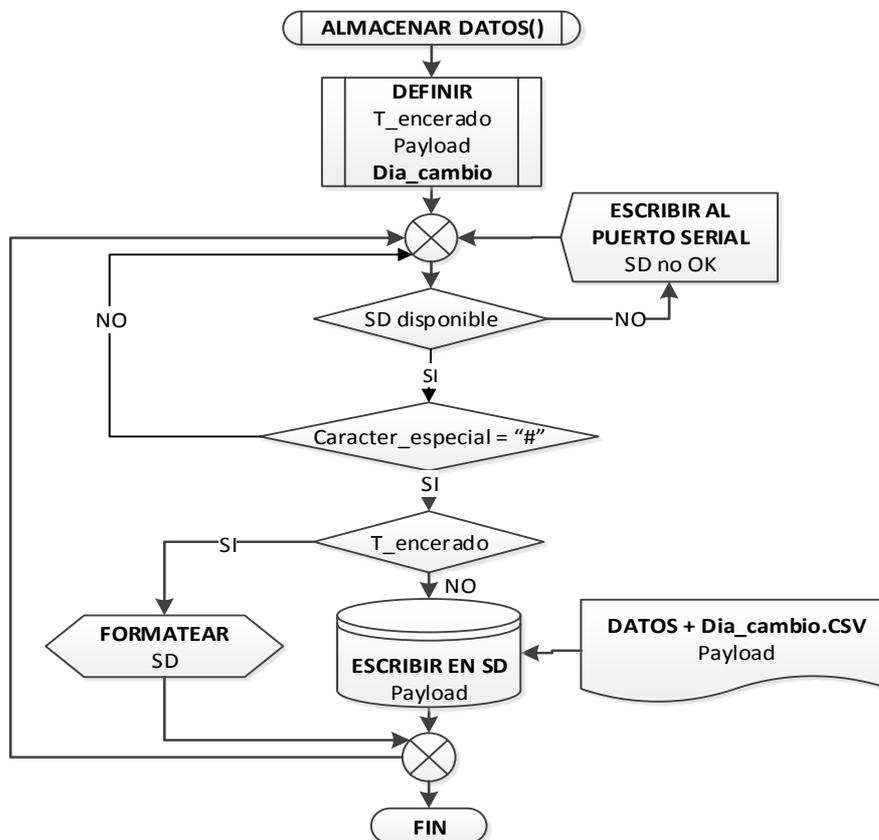


Figura 3.31 Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos en formato CSV.  
Fuente: Autores.

Según la gráfica de la Figura 3.32 obtenida en pruebas de laboratorio, resulta evidente que la cantidad de datos por extraer aumenta en función del tiempo (en menos de 4s se descargan las tramas de la última hora de recolección), se almacenan los datos de los nodos remotos de un día y al extraerlos representa un tiempo corto de descarga. Pero al tener registros de un mes se intervendría el canal por mucho tiempo. Por esto es ventajoso hacer cambios periódicos de nombre al archivo de almacenamiento, con el fin de que a la hora de extraer datos (descargarlos) no se intervenga demasiado tiempo el buffer de lectura serial. El diagrama de flujo del algoritmo que logra esto se muestra en la Figura 3.33.

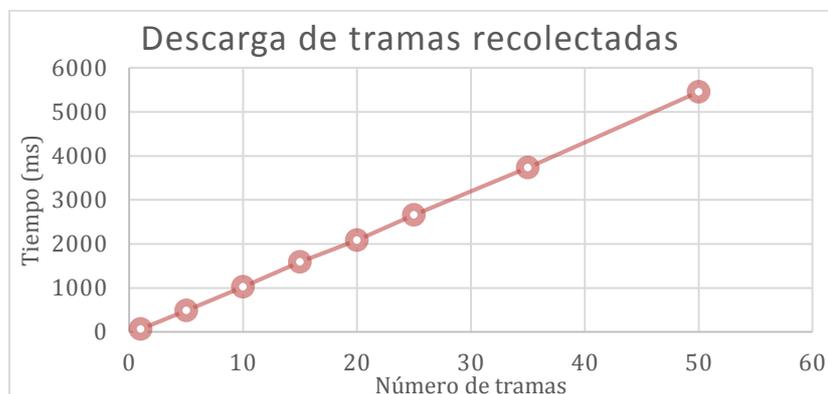


Figura 3.32 Tiempo de intervención del puerto Serial en función al número de tramas.  
Fuente: Autores.

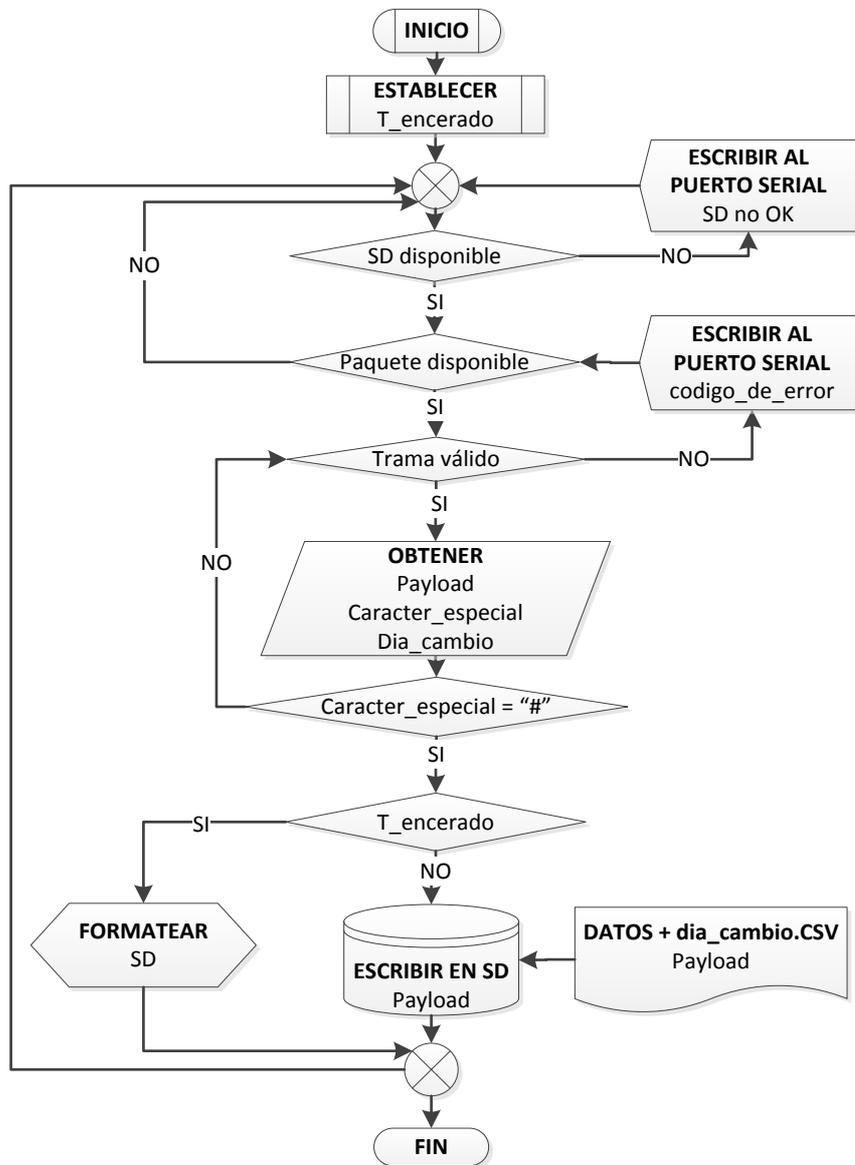


Figura 3.33 Algoritmo para el cambio de nombre de un archivo CSV.  
Fuente: Autores.

Basado en los subprocesos anteriores, en la Figura 3.34 se muestra el firmware RECDAT. El porcentaje de procesamiento requerido para este firmware es de 67% y 72% de memoria dinámica. En este caso se utiliza de la memoria flash 21.44kB y 1.44kB de memoria SRAM.

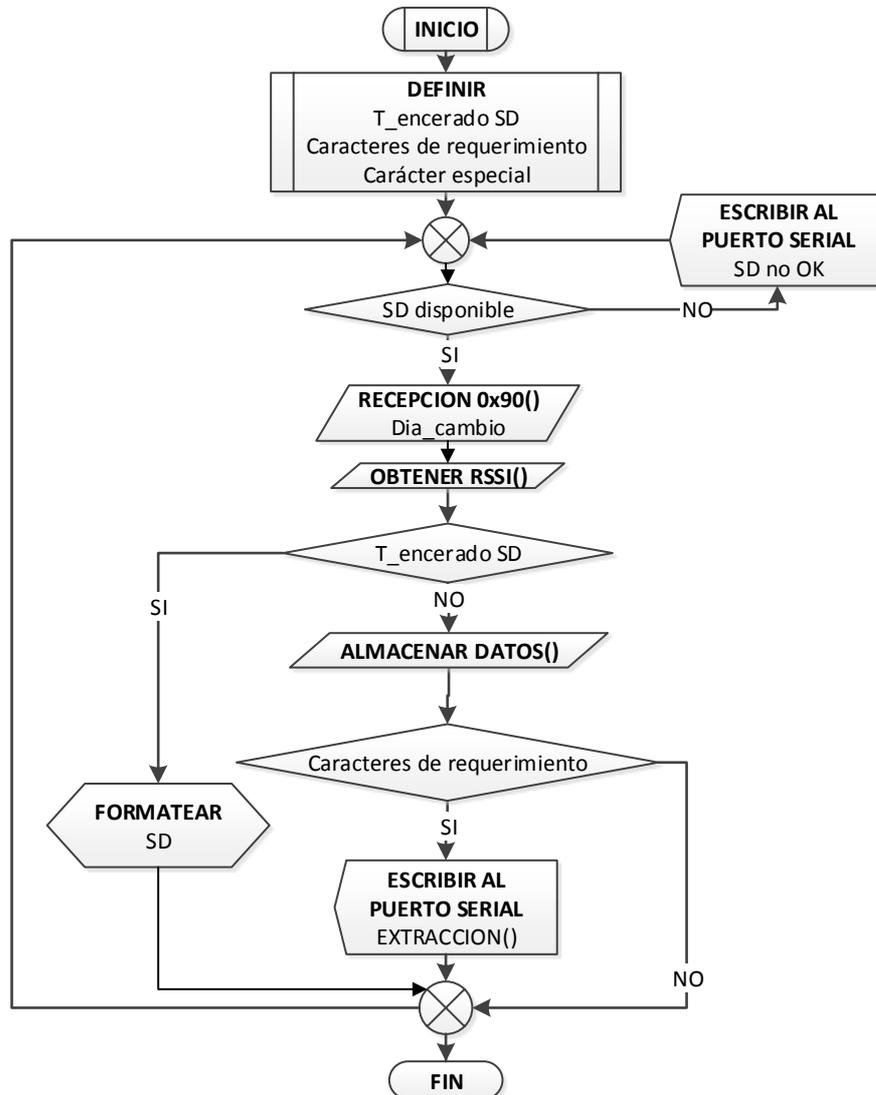


Figura 3.34 Diagrama de flujo del firmware RECDAT.  
Fuente: Autores.

### 3.3.2.2 Firmware para la arquitectura REPDAT

En la sección 3.2.1.2 se explicó la necesidad de realizar un control de flujo en los datos, por lo cual es necesario usar un microcontrolador externo que hace de árbitro e intercambia datos entre dispositivos XBee, uno para recepción y otro para retransmisión (se añade el efecto de una comunicación full dúplex). La Figura 3.35 muestra el firmware REPDAT. El porcentaje de procesamiento que se ocupara en este firmware es de 33% (10.56kB de memoria flash) y 46% de memoria dinámica (0.92kB de SRAM).

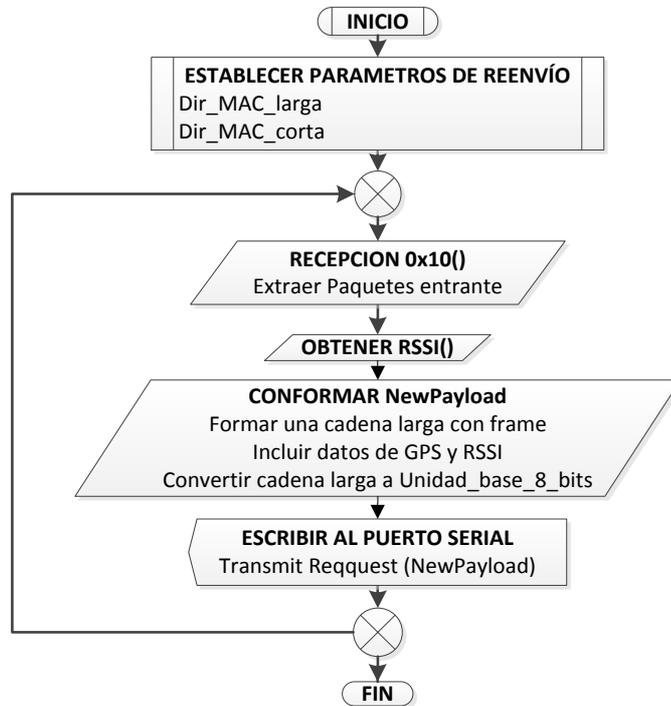


Figura 3.35 Firmware de REPDAT API 0x10 Transmit Request.  
Fuente: Autores.

### 3.4 Nodo estación base

Su función es interactuar con el operador. Requiere de una interfaz previa que haga la traducción de datos provenientes del nodo móvil (UART-USB).

#### 3.4.1 Hardware del nodo estación base.

En el caso del nodo estación base se requiere a parte del módulo de comunicación un microcontrolador que se encarga de obtener por comando AT el nivel de señal. De no ser así únicamente sería necesario una interfaz de conversión RS232 a USB. En la Figura 3.36 se visualiza el hardware necesario para receptor datos en la estación base. En este caso el microcontrolador es el mismo ATmega328p de una placa de desarrollo *RedBoard*. La placa de color negro que se aprecia se trata de una adaptación a un socket tipo BEE (XBee Shield).

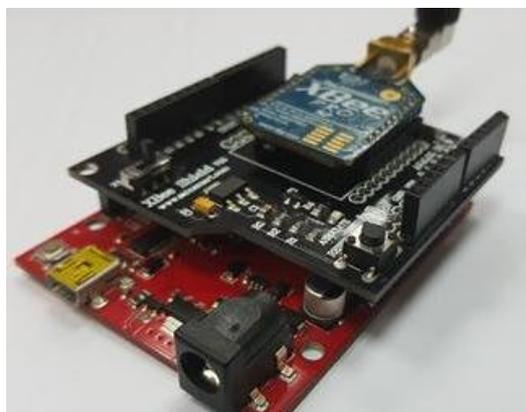


Figura 3.36 Hardware del nodo estación base.  
Fuente: Autores.

### 3.4.2 Firmware del gateway en la estación base de monitoreo.

La unificación de todos los datos y el nivel de señal hasta la estación base de monitoreo se realizan en un pequeño código que reutiliza algoritmia de recepción de tramas 0x90 y obtención del RSSI (ver Figura 3.37). Este funciona para las dos arquitecturas REPDAT y RECDAT. Se ocupa 6.4kB de memoria flash (20% de procesamiento) y 0.44kB de memoria SRAM (22% de memoria dinámica).

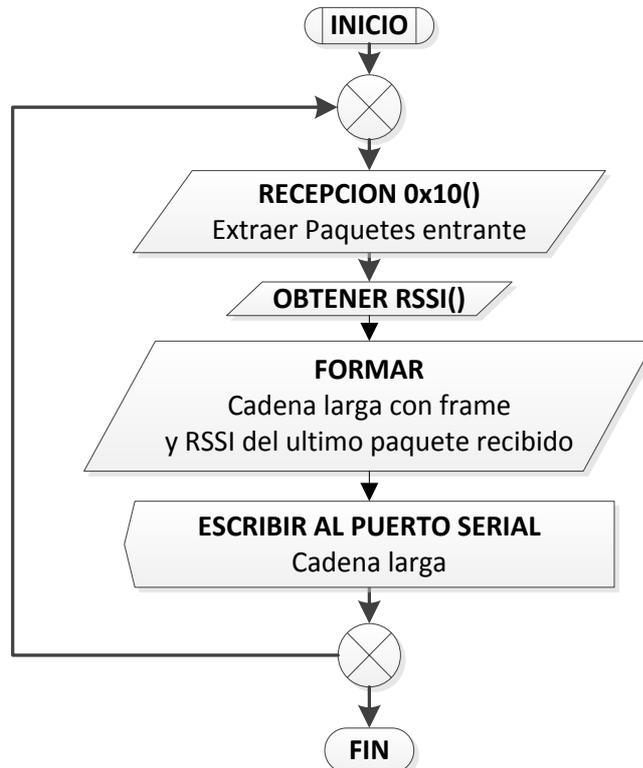


Figura 3.37 Diagrama de flujo para la recepción (estación base de monitoreo).  
Fuente: Autores.

En la Figura 3.38 se encuentra el algoritmo de la interfaz de usuario, realizada en el software LabVIEW.

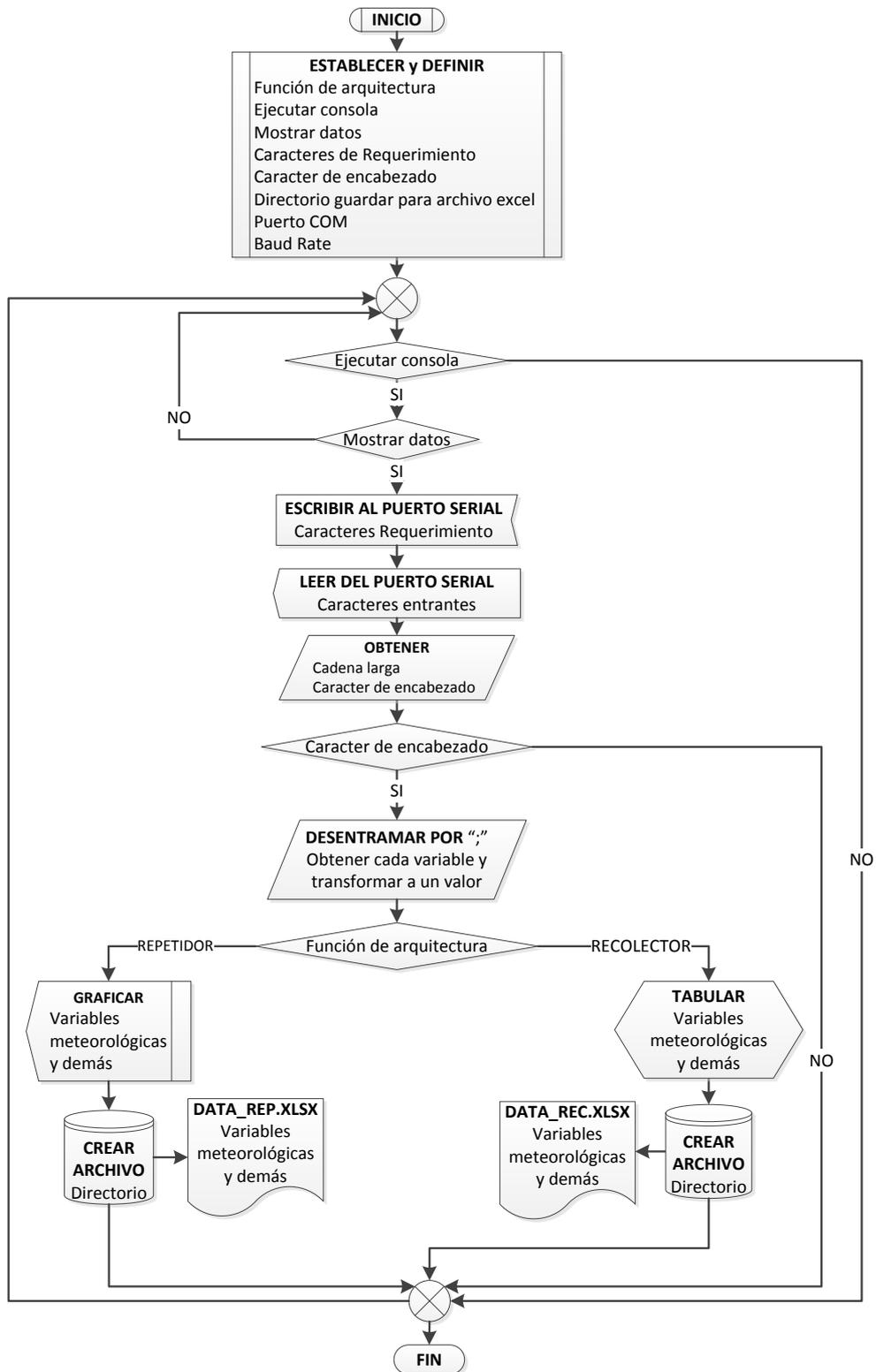


Figura 3.38 Diagrama de flujo del algoritmo para la consola de monitoreo.  
Fuente: Autores.

### 3.4.3 Aplicación de monitoreo.

Esta interfaz se desarrolló usando el software de programación en bloques LabVIEW, el mismo ofrece herramientas perfectamente personalizables según sea la necesidad. Luego de

haberse depurado se procedió a realizar un ejecutable (.EXE). Así será necesario configurar el puerto COM y la velocidad de transferencia de datos en el denominado *Panel de Control* (ver Figura 3.39). Posteriormente se procederá a establecer la latitud y longitud de cada uno de los nodos fijos que conformarán el sistema, para mayor facilidad la trama que son enviadas desde dichos nodos serán valores separados por “;”, mediante los cuales el aplicativo los podrá extraer uno por uno para poder visualizar, almacenar y postearlos en Ubidots.

LabVIEW es la plataforma escogida para este aplicativo, principalmente por ser un software con facilidad al programar debido que posee un tipo de programación gráfica, esto permite que sea más cómodo y su programación sea mucho más rápida. Sus funciones y librerías facilitan en gran porcentaje el trabajo a la hora de programar, ya que muchas funciones vienen completamente desarrolladas y listas para ser usadas.

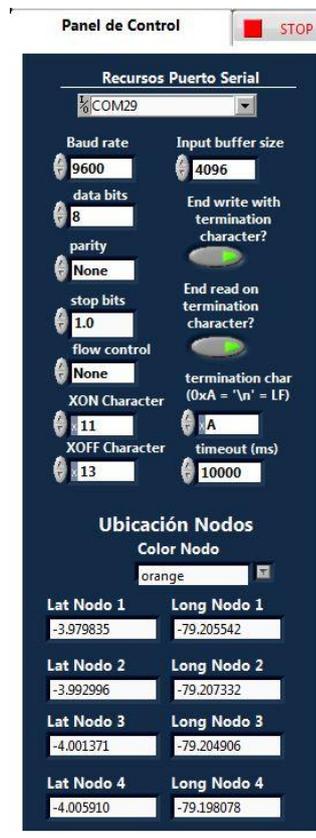


Figura 3.39 Panel de control del aplicativo de monitoreo.  
Fuente: Autores.

Las ventanas desarrolladas disponen de un indicador numérico y un gráfico. En el caso de la arquitectura RECDAT el tiempo de visualización es diferido, aunque el dato recolectado posee la hora y fecha en el instante de captación.

En la Figura 3.40 se muestra visualmente las variables monitoreadas para la arquitectura *REPDAT*, en esta opción pensando en el internet de las cosas se ha desarrollado un subVI para poder subir los datos recolectados por los prototipos en plataformas Middleware IOT (Internet of Things), como lo es Ubidots.

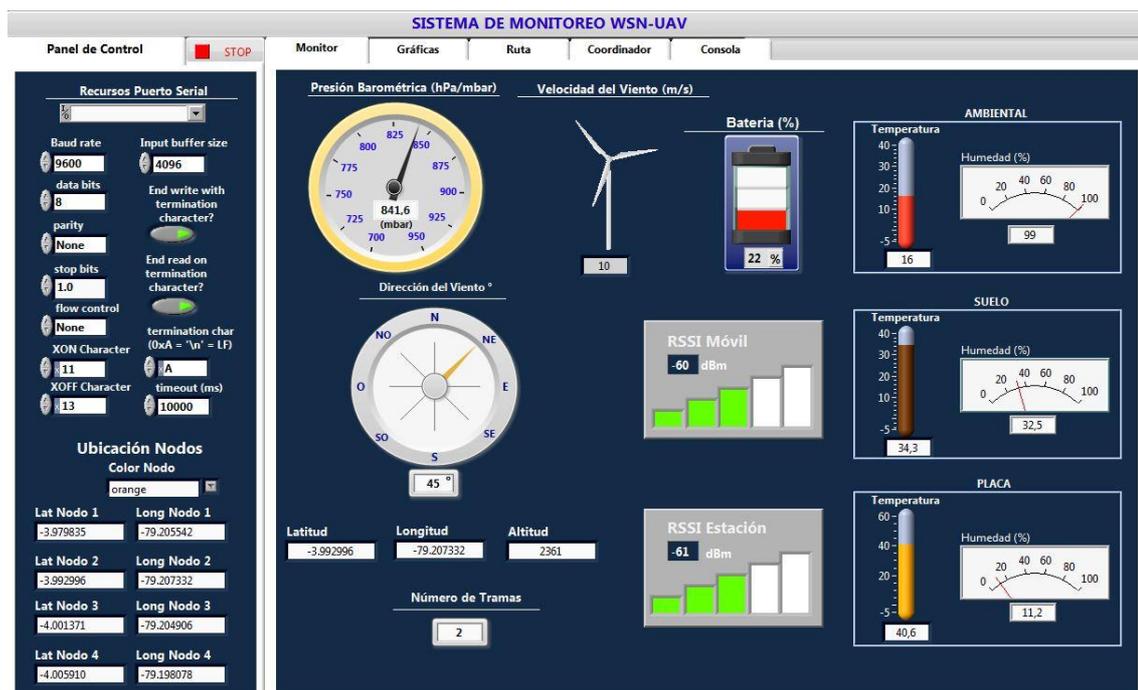


Figura 3.40 Opción "Monitor" del aplicativo de escritorio.  
Fuente: Autores.

Para poder subir datos a esta plataforma desde LabVIEW solo son necesarias 3 cosas:

- 1) Token de autenticación, es una llave temporal que sirve como contraseña para acceder al API.
- 2) Variable ID, sirve para identificar a cada una de las variables.
- 3) Valor a enviar.

La plataforma Ubidots brinda a los desarrolladores múltiples servicios que permiten integrar los flujos de datos en un ambiente de computación en la nube, para poder captar información proveniente del mundo real. Las ventajas que ofrece la plataforma Ubidots son:

- Capacidad para publicar los datos sobre una *API REST*.
- Flexibilidad, mezcla diferentes flujos de datos y presentarlos en el *dashboard* de la plataforma.
- Soluciones ubicuas, permite servicios en la nube.
- Seguridad, basada en mecanismos de autenticación mediante *API KEY* o *tokens*.

En la Figura 3.41 se puede observar el registro de las variables, las cuales son posteadas desde LabVIEW al servidor Ubidots.

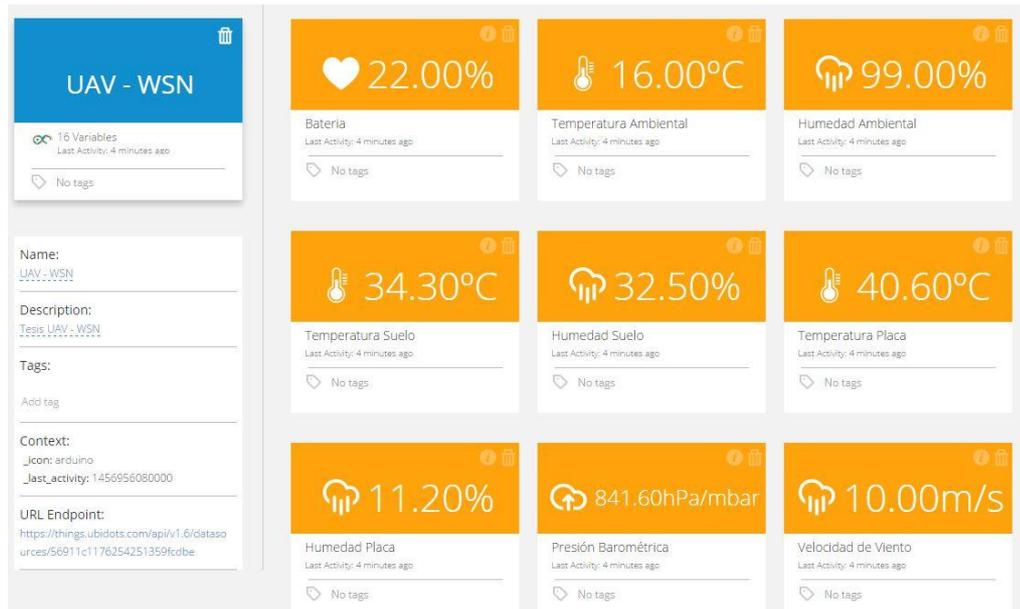


Figura 3.41 Publicación de los datos recolectados en Ubidots.  
Fuente: Autores.

En la Figura 3.42 aparece una ventana de curvas para la arquitectura *REPDAT* y *RECDAT*, con su respectivo tiempo en las que fueron adquiridos.



Figura 3.42 Opción "Gráficas" del aplicativo de escritorio.  
Fuente: Autores.

En la Figura 3.43 aparece un mapa en la cual se trazará la ruta por donde vuela el drone, diseñado para la arquitectura REPDAT.

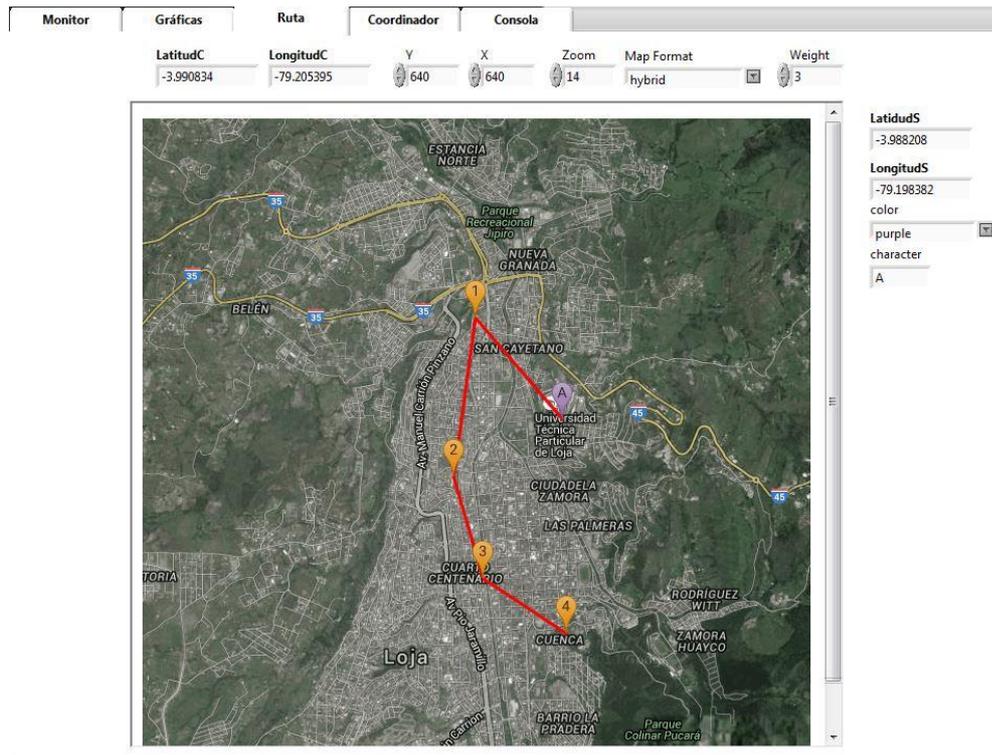


Figura 3.43 Opción "Ruta" para el aplicativo de escritorio.  
Fuente: Autores.

En la Figura 3.44 se muestra como se tabula los datos provenientes de la arquitectura RECDAT.

Monitor Gráficas Ruta **Coordinador** Consola

Write Datos Recolectados 7

NODO	FECHA	HORA	TEMP. AMB	HUM. AMB	TEMP. SUELO	HUM. SUELO	TEM. PLACA	HUM. PLACA	PRES.	BAR. VEL.	VIE.	DIR. V	BATERIA	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	RSSI MÓVIL	RSSI EST.
1	22/02/2016	10:25:23	26,6	94,3	26,3	45,5	46,6	25,2	881,6	4,0	90	90	-3,988206	-79,198401	2361,7	-44	-41	
2	22/02/2016	10:27:41	26,3	94,4	26,2	45,5	46,6	25,2	881,6	4,0	90	88	-3,988131	-79,198755	2361	-51	-50	
3	22/02/2016	10:29:12	26,3	94,1	26,1	45,5	46,6	25,2	881,6	4,0	90	56	-3,987023	-79,198642	2361,5	-38	-40	
4	22/02/2016	10:31:51	26,5	94,8	26,5	45,5	46,6	25,2	881,6	4,1	90	69	-3,986145	-79,198362	2362	-61	-61	
5	22/02/2016	10:33:36	26,1	94,3	26,2	45,5	46,6	25,2	881,6	4,2	90	50	-3,986113	-79,198444	2360	-58	-54	
6	22/02/2016	10:35:23	26,8	94,1	26,5	45,5	46,6	25,2	881,6	3,9	90	18	-3,986161	-79,198568	2365,5	-44	-45	
7	22/02/2016	10:37:10	26,3	94,6	26,5	45,5	46,6	25,2	881,6	4,1	90	66	-3,986145	-79,198362	2362	-49	-52	

Figura 3.44 Opción "Coordinador" del aplicativo de escritorio.  
Fuente: Autores.

En la gráfica 3.45 se puede ver un monitor serie para efectuar pruebas de transmisión y recepción de datos del puerto COM.

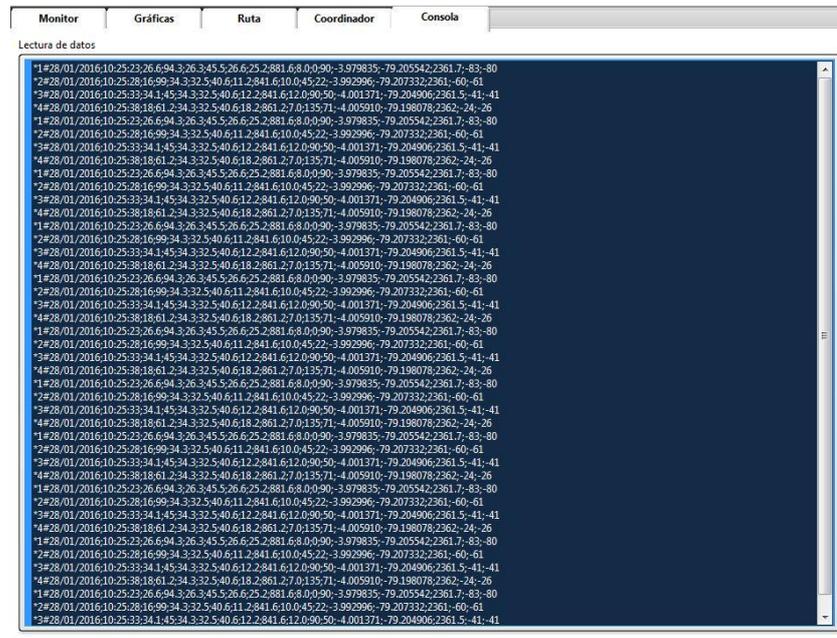


Figura 3.45 Opción "Consola" del aplicativo de escritorio.  
Fuente: Autores.

### 3.5 Tecnologías inalámbricas de comunicaciones basadas en XBee.

Para la realización de experimentos se establece escenarios en los que las condiciones se deben mantener. Este escenario de prueba reduce al máximo las variables a controlar. Una de las variables más importantes es la potencia de transmisión con la que se definirían: el rango de cobertura del enlace, altura y distancia hacia el punto de medición. Así se consideran opciones como XBee S2, XBee S2 Pro y XBee-Pro 900 para cubrir la parte de transmisión de datos (ver Figura 3.46). En ese orden resulta más favorable el resultado de las variables descritas. A la hora de probar el sistema se usa XBee S2 con el fin de reducir el tamaño del escenario de pruebas.

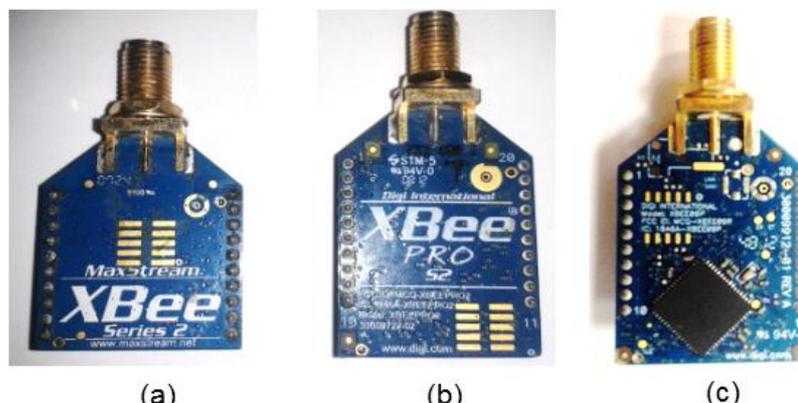


Figura 3.46 a) XBee S2, b) XBee S2 PRO y c) XBee PRO-900.  
Fuente: Autores.

XBee S2 es un módulo que utiliza ZigBee, soporta firmwares ZB, SE y propietario DigiMesh. Trabaja a una frecuencia de 2.4GHz, desde 2400MHz a 2483,5MHz es decir 16 canales de 5MHz. El conector para la antena es un SMA de polaridad invertida. La diferencia de este módulo y la siguiente generación XBee Pro S2 es la potencia de transmisión y con ello mejoras en el rango de enlace, sensibilidad en recepción, etc. Por su parte XBee PRO 900 es otro módulo basado en el estándar IEEE 802.15.4 que concentra pilas de hardware de control que establecen el protocolo de comunicación y un bloque de radiofrecuencia para la transmisión de datos en el mismo chip. Operan en la banda ISM de 900 MHz y poseen un conector SMA-RP para la antena. Soportan dos versiones de firmwares para protocolos: propietario de largo alcance punto multipunto (100x XBee-PRO 900) y DigiMesh (182x XBee-PRO DigiMesh 900). Ambos compatibles con el MODO API de un XBee24 S2 por el direccionado de 64 bits entre dirección MAC larga y corta. Se describen las especificaciones en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Especificaciones XBee S2 / XBee PRO S2/ XBee-PRO 900.

<b>Especificaciones</b>	<b>XBee S2</b>	<b>XBee PRO S2</b>	<b>XBee PRO 900</b>
Potencia de Transmisión (mW)	2	50	50
Sensibilidad del Receptor (10%)	-96	-102	-100
Alcance Interiores (m)	40	60	140
Alcance Exteriores (m)	120	1500	30000
Velocidad de datos RF (kbps)	250	250	156,25
<b>Requerimientos de Energía</b>			
Voltaje de Alimentación (V)	2.1 – 3.6	3.0 – 3.4	3.0-3.6
Corriente de Transmisión (mA)	40	170	210
Corriente de Recepción (mA)	40	45	80
Corriente de Apagado (uA)	1	3,5	60(a 3.3V)
<b>General</b>			
Frecuencia Mínima (MHz)	2405	2405	902
Frecuencia Máxima (MHz)	2480	2480	928
Canales	16 (11-26)	14(11-24)	12
Método de Configuración	API o AT	API o AT	API o AT
Opciones de Antena	PCB embebido, por	PCB embebido,	Látigo por Cable,
Temperatura de Operación	-40 a 85	-40 a 85	-40 - 85
Dimensiones (cm)	2.438 x 2.761	2.438 x 3.294	2.443 x 3.332

Fuente: Extraída de [63] [64].

En la asignación de pines (PINOUT) se mantiene el mismo formato BEE, así que es el mismo en los tres casos (véase Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Asignación de pines para los módulos XBee.

Pin #	Nombre	Dirección	Descripción
1	VCC	-	Power Supply
2	DOUT	Output	UART data Out
3	DIN / $\overline{CONFIG}$	Input	UART data In
4	DIO12	Either	Digital I/O 12
5	$\overline{RESET}$	Input	Module Reset (reset pulse must be at >200ns)
6	PWM0 / RSSI / DIO10	Either	PWM Output 0 / Rx signal Strength Indicator/
7	PWM / DIO11	Either	Digital I/O 11
8	[reserved]	.	Do not connect
9	$\overline{DTR}$ / SLEEP_RQ / DIO8	Either	Pin Sleep Control Line or Digital IO 8
10	GND	-	Ground
11	DIO4	Either	Digital I/O 4
12	$\overline{CTS}$ / DIO7	Either	Clear-to-send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / $\overline{SLEEP}/DIO9$	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9
14	[reserved]	-	Do not connect
15	Associate / DIO5	Either	Associate Indicator, Digital I/O 5
16	$\overline{RTS}$ / DIO6	Either	Request-to-send Flow Control, Digital I/O
17	AD3 / DIO3 /	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2 /	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1 /	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0 / ID BUTTON	Either	Analog Input 0 / Digital I/O 0 or Node Indication

Fuente: Extraída de [63] [65].

## **CAPÍTULO IV**

### **4 PRUEBAS Y RESULTADOS**

#### 4.1 Pruebas de laboratorio

Estas pruebas tienen como objetivo dar una noción sobre posibles rangos de cobertura, polarización de antenas, altura nominal, separación entre nodos, etc. Para este propósito se utilizó la herramienta Radio Mobile que usa el modelo de propagación estadístico Longley-Rice [66], apropiado en el cálculo de pérdidas por espacio libre en función de altura media del terreno, refracción de la troposfera y perfiles del terreno. Está definido en la gama de frecuencia de 20 MHz a 20 GHz.

El software requiere una localía especificada por puntos coordenados. Se eligió: 4° 0'6.18"S, 79°13'49.44"O por contar con una apertura visual de 450m y su entorno aéreo es libre (ver Figura 4.1). La localización de equipos se muestra en la Tabla 4.1.



Figura 4.1 Escenario de simulaciones. (Google Earth)  
Fuente: Autores.

Tabla 4.1 Localización de los equipos.

Dispositivo	Latitud	Longitud	Altitud	Torre
Dispositivo Final (ED)	4°00'09,4" S	79°13'49,2" O	2226 msnm	3 m
Router (R)	4°00'02,9" S	79°13'49,2" O	2206 msnm	3 – 100 m
Coordinador (C)	4°59'56,0" S	79°13'49,2" O	2190 msnm	3 m

Fuente: Autores.

En las simulaciones no se consideran velocidad de vuelo del nodo móvil, posibles vibraciones ocasionadas por el flujo de viento que inciden en la mantención del enlace.

##### 4.1.1 Simulación 1: enlace punto a punto

Se trata de un enlace entre 2 módulos XBee configurados como: dispositivo final "ED" y coordinador "C" (ver Figura 4.2). Se usa antenas dipolo de 2 dBi a 2.4 GHz situadas a 3m sobre el suelo (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Especificaciones simulación 1.

Especificaciones	Valor
Tipo de enlace	Por Tierra
Altura de antena	3 m
Equipos	XBee S2. Un "C" y un "ED".
Potencia de Transmisión	2 mW
Sensibilidad nominal de receptor	-96 dBm
Ganancia de las antenas	2 dBi, omnidireccional

Fuente: Autores.

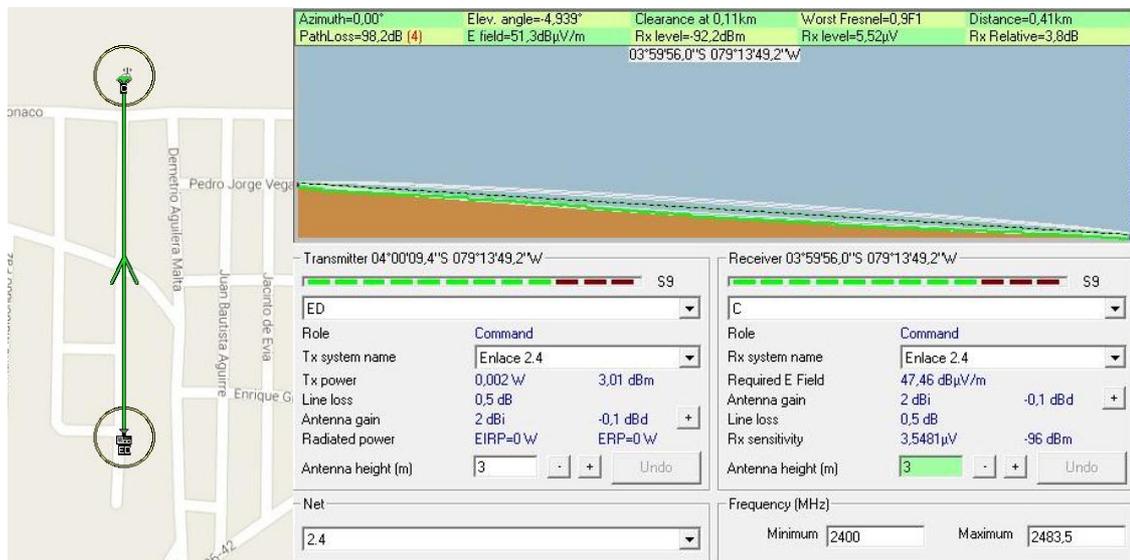


Figura 4.2 Diagrama del enlace con Radio Mobile del ED - C. (Simulación 1)

Fuente: Autores.

El enlace tiene un ángulo de elevación de  $-4.9391^\circ$  que tiende a cero por cuanto la pendiente del terreno (ver Figura 4.3). Es decir frente al posible aumento de altura de la antena el ángulo de elevación cambia para mantener el enlace. El nivel de señal en recepción es  $-92.2\text{dBm}$ .

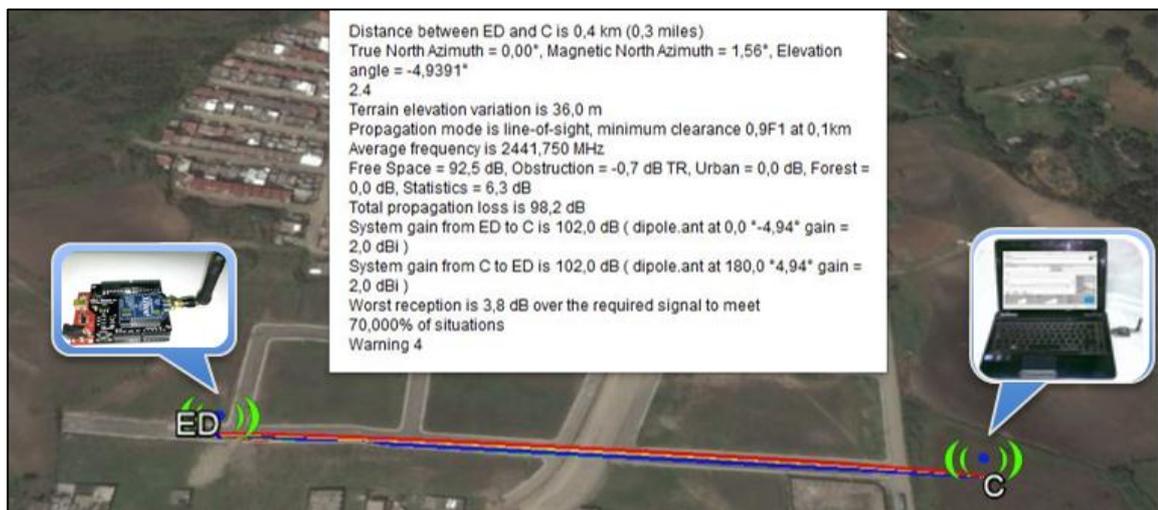


Figura 4.3 Comprobación de línea de vista enlace del ED - C. (Google Earth)

Fuente: Autores.

#### 4.1.2 Simulación 2: enlace incluyendo un módulo Router.

En este apartado se simula la comunicación entre dispositivo final “ED” y coordinador “C” a través de un router “R”. Esta situación ocurre frente a la inexistencia de un enlace directo. Se especifica las condiciones en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Especificaciones simulación 2.

Especificaciones	Valor
Tipo de enlace	Por Tierra
Altura de antena	3 m
Equipos	XBee S2. Un “C”, un “R” y un “ED”.
Potencia de Transmisión	2 mW
Sensibilidad nominal de receptor	-96 dBm
Ganancia de las antenas	2 dBi, omnidireccional

Fuente: Autores.

En esta simulación la atenuación de la señal abornda -87.1dBm entre el “ED” y “R” y -86dBm entre “R” y “C” (ver Figuras 4.4 y 4.5). Se mejora en 6dBm respecto al enlace anterior o se requiere  $\frac{1}{4}$  de potencia menos.

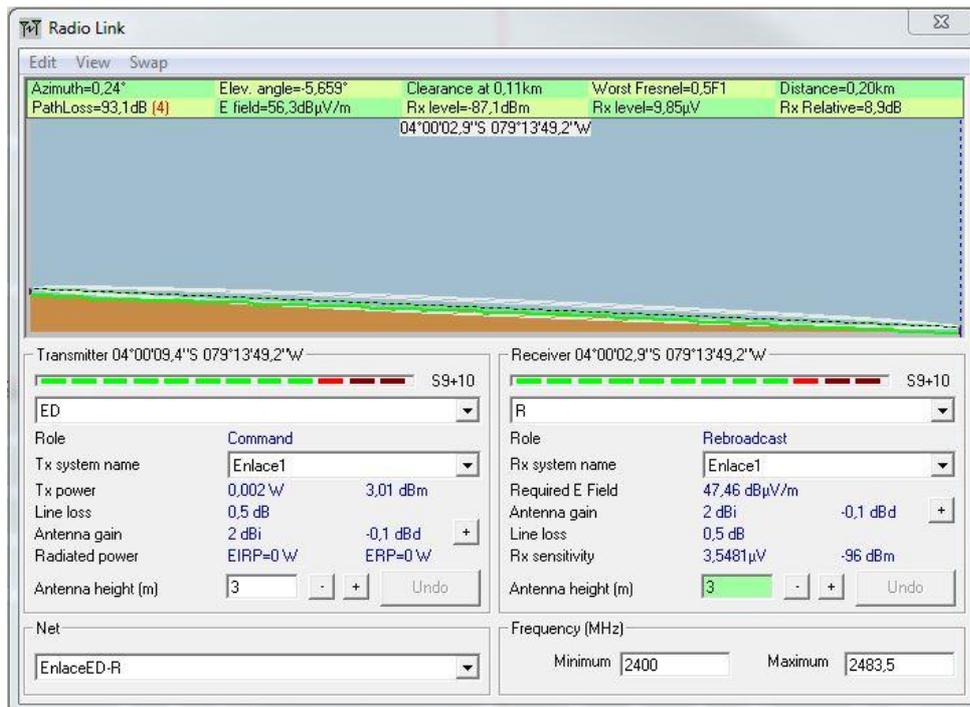


Figura 4.4 Diagrama del enlace entre ED - R. (Simulación 2)

Fuente: Autores.

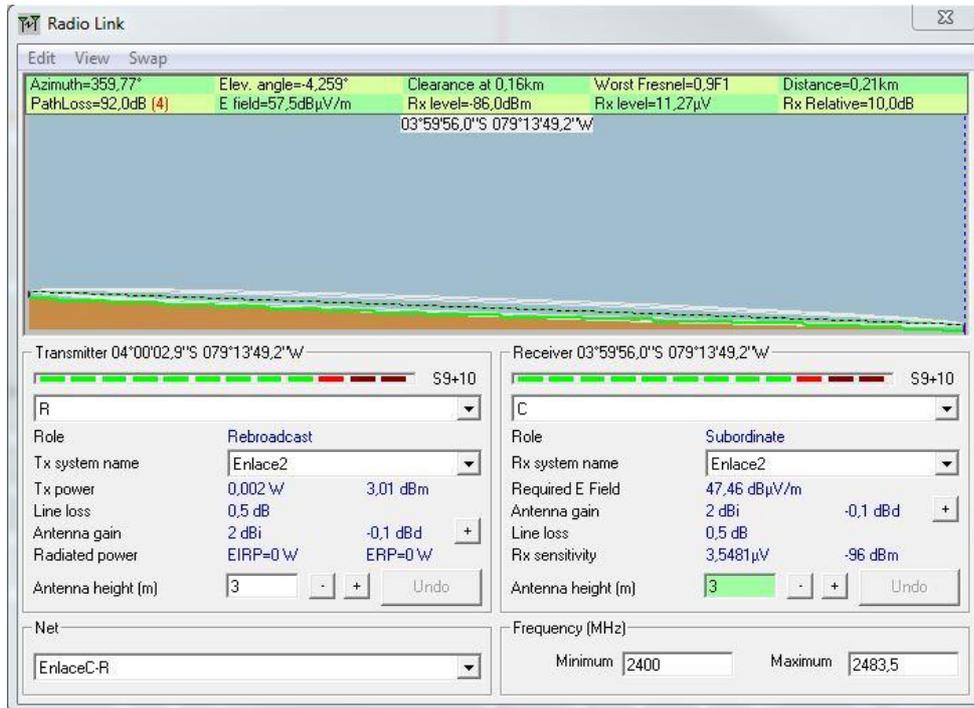


Figura 4.5 Diagrama del enlace entre R – C. (Simulación 2)  
Fuente: Autores.

El azimut y ángulo de elevación no muestra un gran cambio respecto a la simulación 1 (ver Figuras 4.6 y 4.7).

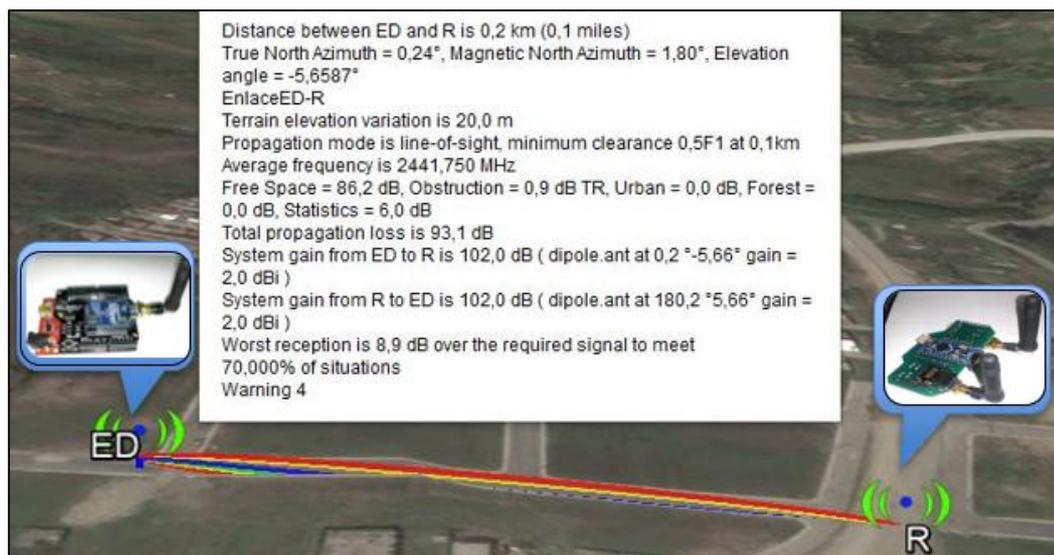


Figura 4.6 Comprobación de línea de vista enlace del ED - R. (Google Earth)  
Fuente: Autores.

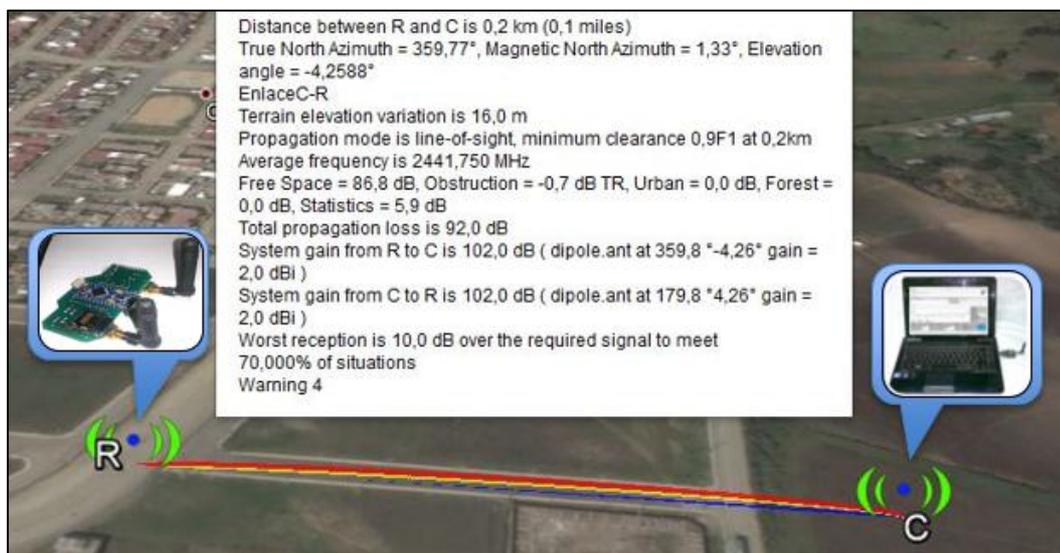


Figura 4.7 Comprobación de línea de vista enlace del R - C. (Google Earth)  
Fuente: Autores.

#### 4.1.3 Simulación 3: enlace con altura de antena del router a 100m.

Se destaca que la altura de la antena del dispositivo router asciende a 100m (ver Tabla 4.4). Se simula un vuelo a esa altura.

Tabla 4.4 Especificaciones simulación 3

Especificaciones	Valor
Tipo de enlace	Por Tierra/Aire
Altura de antena	3 m, 100 m, 3m
Equipos	XBee S2. Un "C", un "R" y un "ED"
Potencia de Transmisión	2 mW
Sensibilidad nominal de receptor	-96 dBm
Ganancia de las antenas	2 dBi, omnidireccional

Fuente: Autores.

Cada enlace tiene una proyección de 200m, atenuándose la señal a -86dBm entre "ED" a "R" y -88.3dBm entre "R" a "C" (ver Figuras 4.8 y 4.9). A esta altura un único equipo encamina datos. El experimento muestra enlaces factibles. En el enlace "ED" – "R" el azimut es 0° y en elevación con 21° (ver Figura 4.10). En el caso "R" – "C" el azimut es igualmente 0° y el ángulo de elevación -27.882° (ver Figura 4.11). No se simula movimientos que varíen los ángulos de elevación o azimut y produzcan la pérdida del enlace.

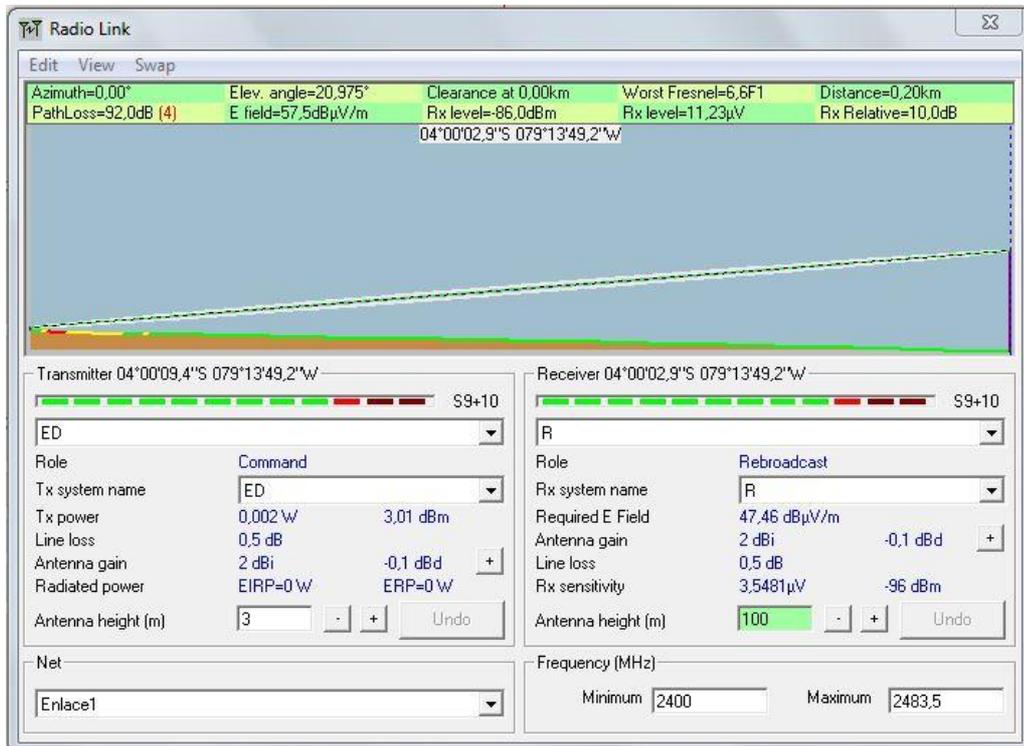


Figura 4.8 Diagrama del enlace entre ED – R a 100 m. (Simulación 3)  
 Fuente: Autores.

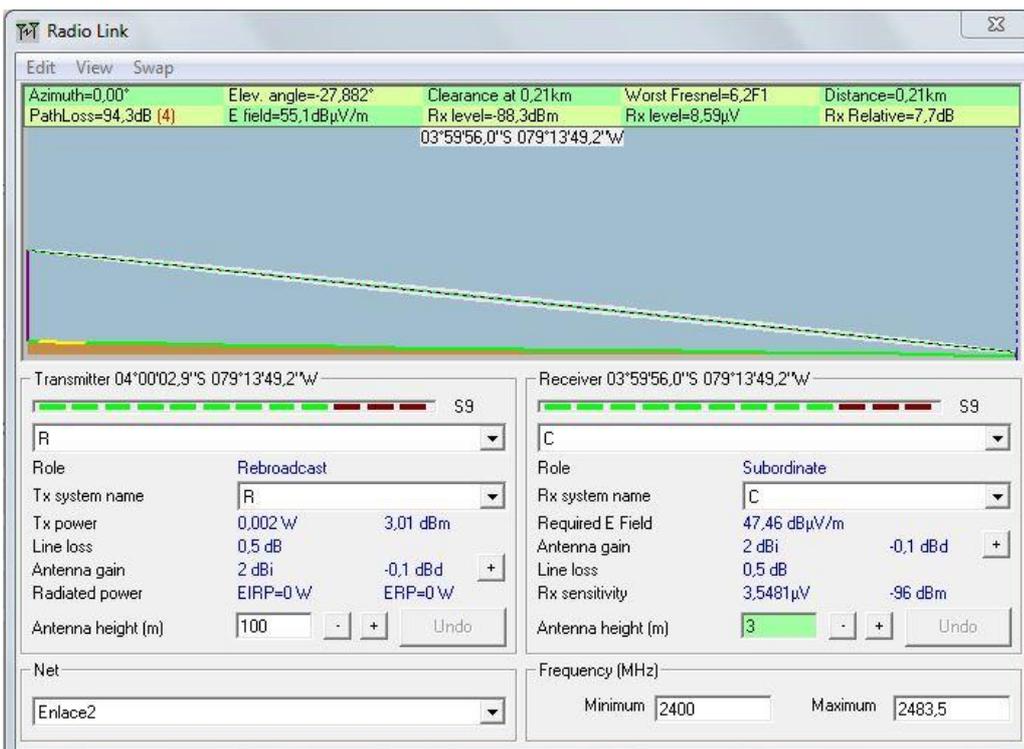


Figura 4.9 Diagrama del enlace entre R a 100 – C. (Simulación 3)  
 Fuente: Autores.

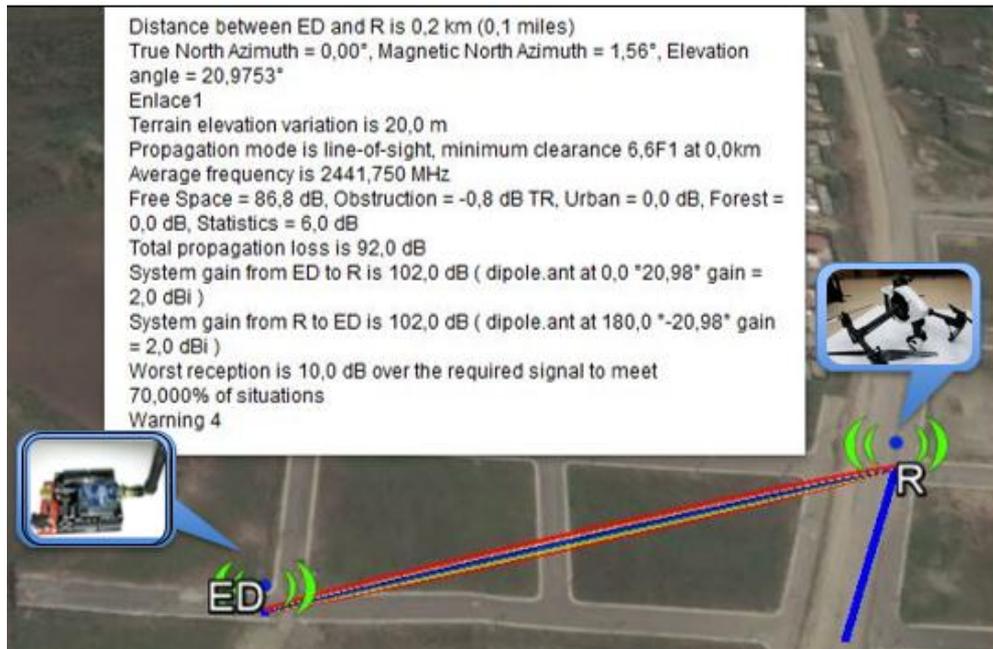


Figura 4.10 Comprobación de línea de vista enlace del ED - R. (Google Earth)  
 Fuente: Autores.



Figura 4.11 Comprobación de línea de vista enlace del R - C. (Google Earth)  
 Fuente: Autores.

En la Figura 4.12 se examinan 3 situaciones que ocasionarían serias pérdidas en el establecimiento del enlace. Un desfase en la ruta del nodo móvil vuelve propenso la mantención del enlace desde un lado y la pérdida en el otro. Las vibraciones ocasionadas por los flujos de viento pueden cambiar el ángulo de elevación y por ende se pierde el enlace. No mantener una altitud correcta también pondría fuera de rango de cobertura.

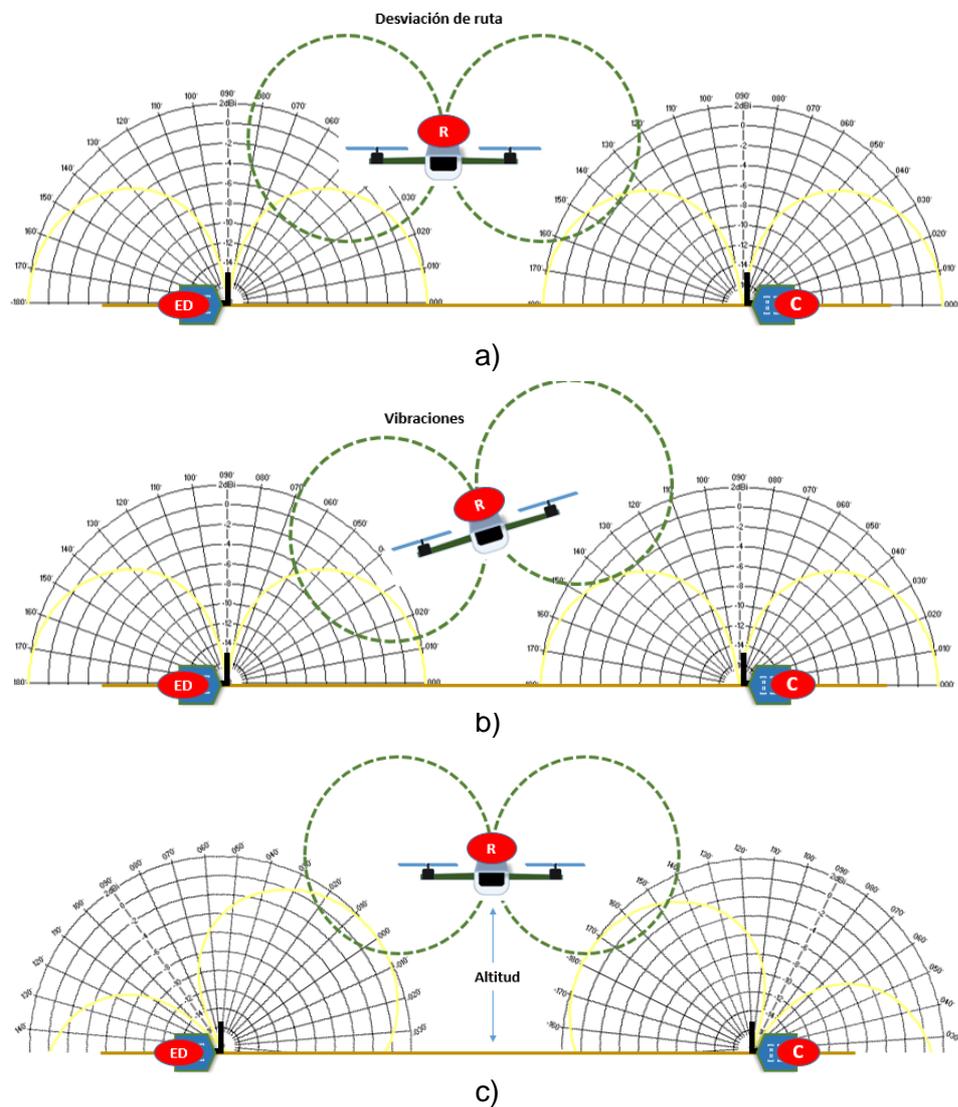


Figura 4.12 a) Problema por desviación de ruta. b) Problema por vibraciones. c) Problema por altitud.  
Fuente: Autores.

#### 4.1.4 Simulación 4: enlace con antena omnidireccional

A diferencia con la simulación 3, esta cuenta con dos módulos router radiando para cada lado de los enlaces. Se especifica los detalles en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Especificaciones simulación 4.

Especificaciones	Valor
Tipo de enlace	Por Tierra/Aire
Altura de Antena	3 m, 100 m, 3m
Equipos	XBee S2. Un "C", dos "R" y un "ED"
Potencia de Transmisión	2 mW
Sensibilidad nominal de receptor	-96 dBm
Ganancia de las antenas	2 dBi, omnidireccional

Fuente: Autores.

Al contar con 2 antenas se tiene la libertad para polarizarlas y lograr un ángulo de elevación de 27° o 21° sin tener efecto entre cada enlace (ver Figura 4.13). El sistema se vuelve más robusto frente a las vibraciones producidas por el flujo de viento.

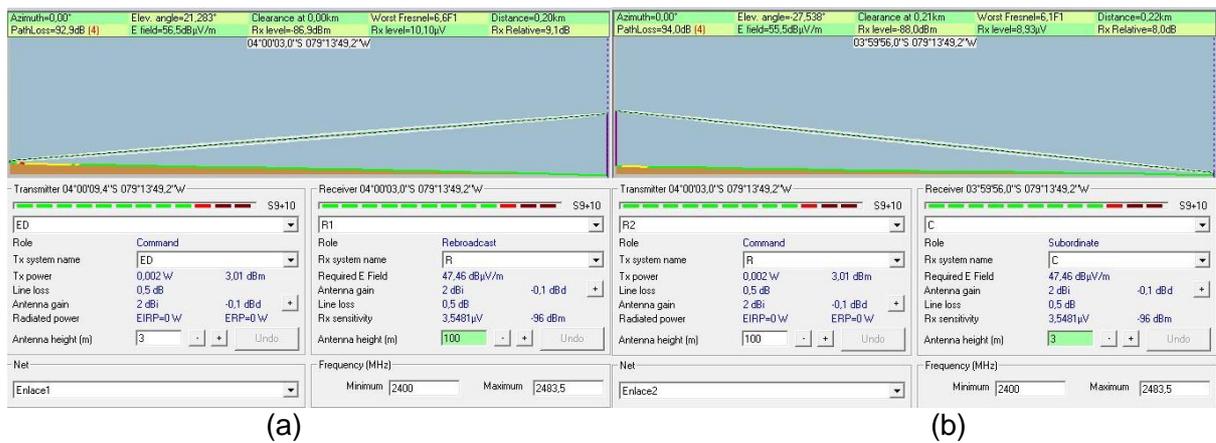


Figura 4.13 Diagrama del enlace, a) ED - R1 b) R2 - C. (Simulación 4)  
Fuente: Autores.

De esto podemos resaltar una posible solución de colocar dos dispositivos router para cada lado del enlace (ver Figura 4.14). Al poseer varios nodos remotos la topología de red más apropiada es en estrella de multipuntos a punto. Estos multipuntos pueden ser separados temporal o espacialmente para evitar colisión de paquetes.

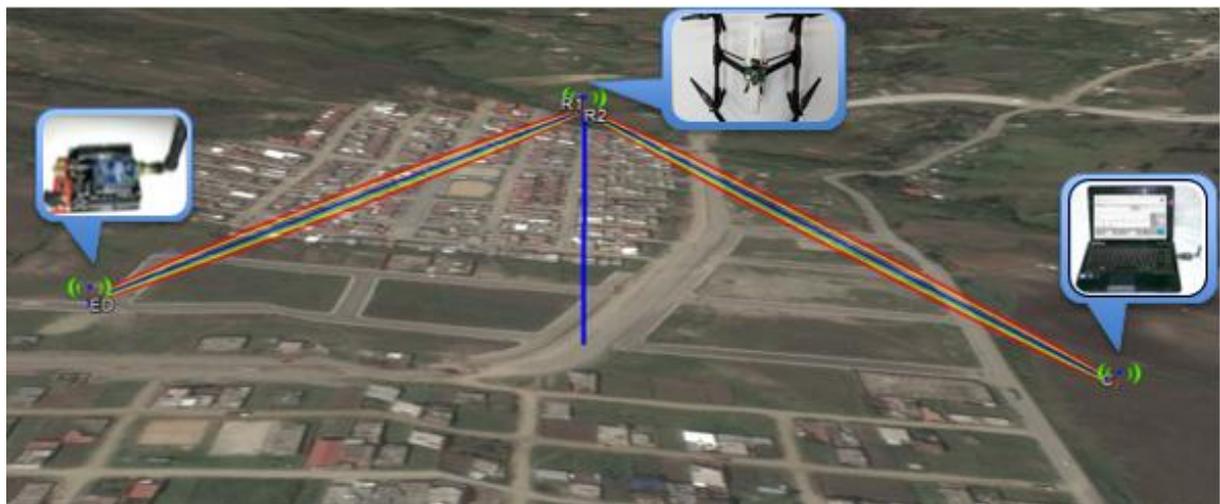


Figura 4.14 Comprobación de línea de vista enlace entre ED - R1 - R2 - C. (Google Earth)  
Fuente: Autores.

#### 4.1.5 Simulación 5: enlace con antena direccional

Se analiza usar antenas direccionales en expectativa de mejorar el nivel de señal en recepción. Se mantiene la misma ganancia de antena de 2dBi. La Tabla 4.6 detalla las condiciones.

Tabla 4.6 Especificaciones simulación 5.

Especificaciones	Valor
Tipo de enlace	Por Tierra/Aire
Altura de Antena	3 m, 100 m, 3m
Equipos	XBee S2. Un "C", dos "R" y un "ED"
Potencia de Transmisión	2 mW
Sensibilidad nominal de receptor	-96 dBm
Ganancia de las antenas	2 dBi, direccional

Fuente: Autores.

Los resultados de esta simulación muestran la atenuación de la señal a -86.9dBm entre el "ED" y "R1" y -88dBm entre "R2" y "C" (ver Figuras 4.15 y 4.16). Aunque resulta valores factibles para implementar los enlaces no existen mejoras respecto al nivel de señal en recepción obtenidos en la simulación 4. Esto podría deberse a que se maneja la misma ganancia y potencia de transmisión.

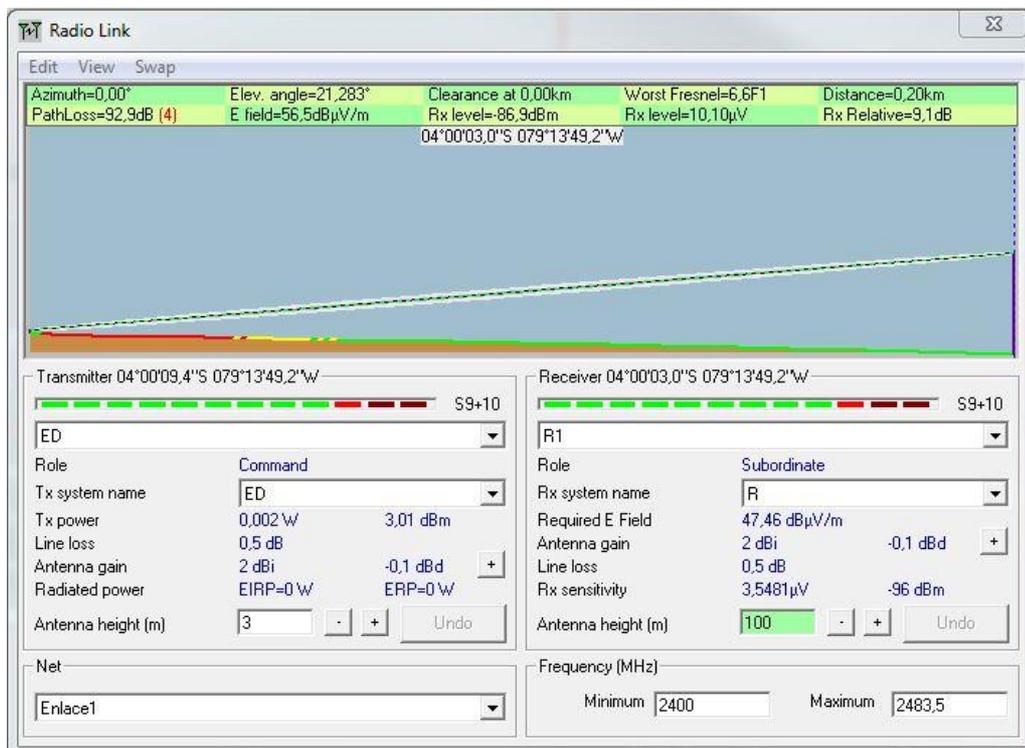


Figura 4.15 Diagrama del enlace entre ED – R con antenas directivas. (Simulación 5)  
Fuente: Autores.

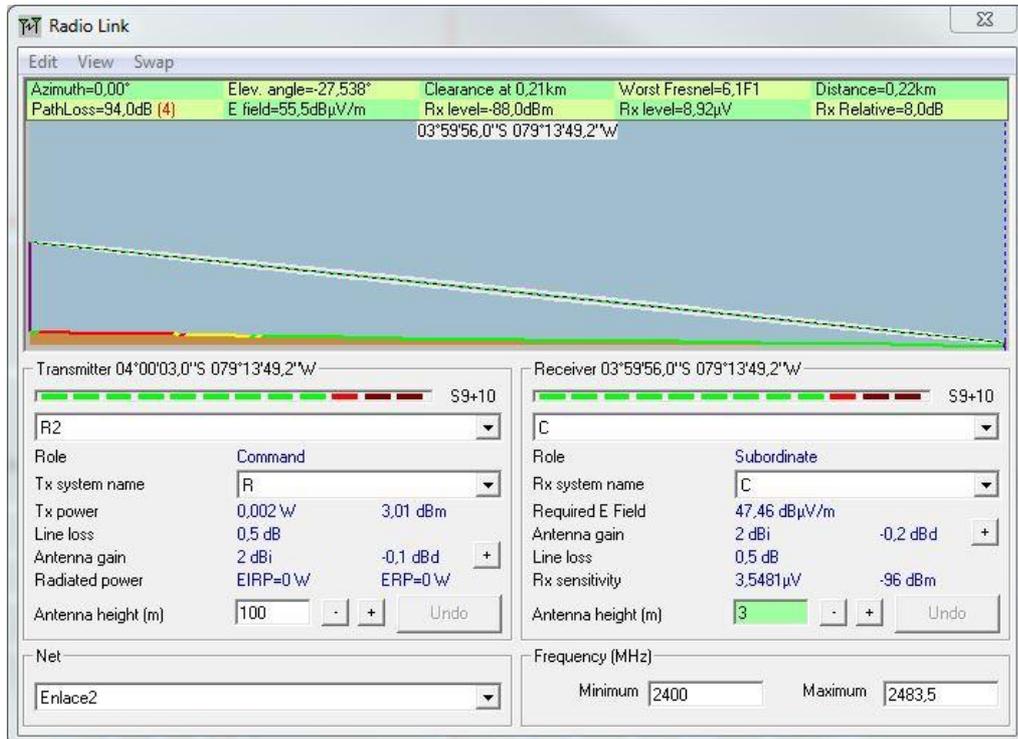


Figura 4.16 Diagrama del enlace entre R - C con antenas directivas. (Simulación 5)  
Fuente: Autores.

Así mismo en azimut “ED” a “R1” es 0° y en elevación 21.2826° (ver Figura 4.17). En el otro caso “R2” a “C” en el azimut también es 0° y en elevación -27.5376 (ver Figura 4.18). Dando resultados similares que en la simulación 4.

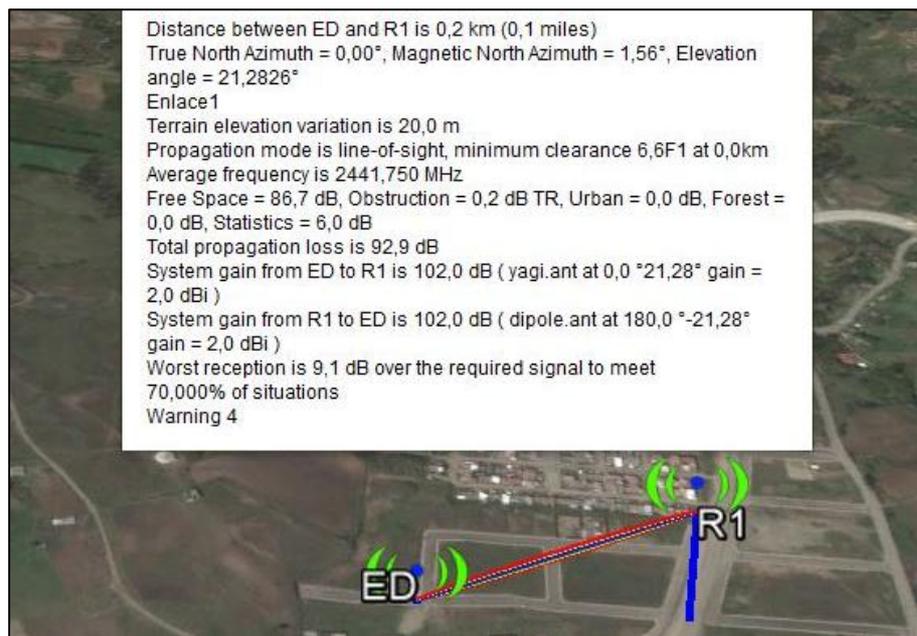


Figura 4.17 Comprobación de línea de vista enlace del ED – R1. (Google Earth)  
Fuente: Autores.

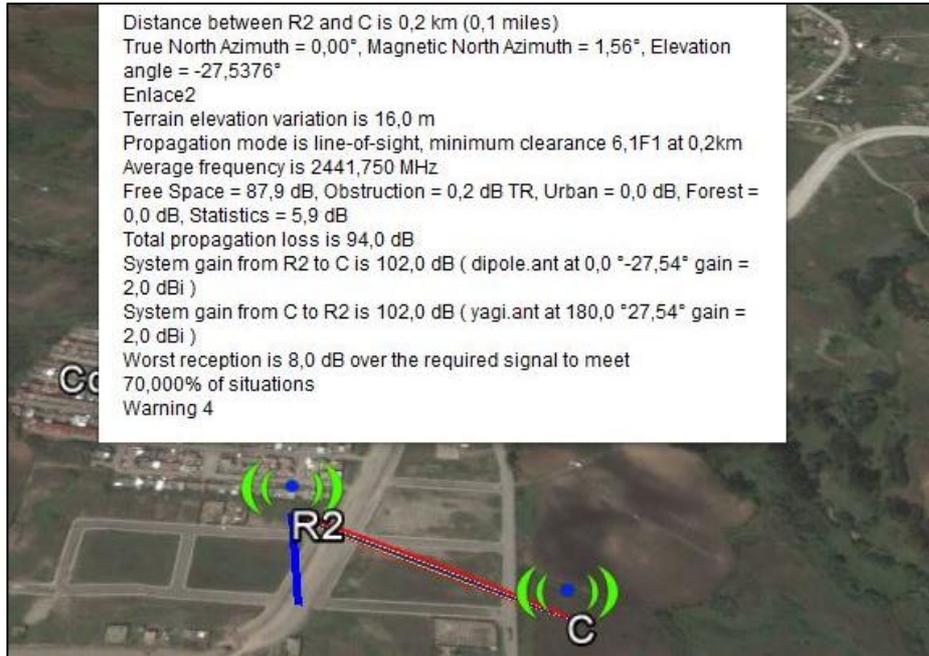


Figura 4.18 Comprobación de línea de vista enlace del R2 - C. (Google Earth)  
Fuente: Autores.

Las antenas direccionales enfocan su energía en una dirección. En teoría se mejoraría el rango de cobertura. En la simulación no se ve una gran mejora en cuanto al nivel de señal en recepción -88dBm. Esto podría deberse a que se maneja la misma ganancia y potencia de transmisión.

#### 4.1.6 Prueba 1: autonomía en función del peso añadido.

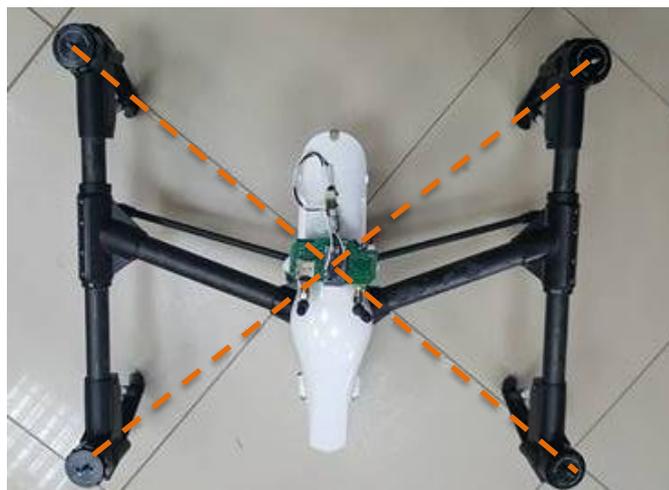


Figura 4.19 Peso de los sistemas completo.  
Fuente: Autores.

Cada UAV es un sistema compensado, así para mantener su equilibrio de cargas se centra el dispositivo como se muestra en la Figura 4.19. El peso del dispositivo completo se obtiene con la balanza analítica Sartorius modelo BP221S (ver Figura 4.20).



Figura 4.20 Peso de los sistemas completo.  
Fuente: Autores.

Se evalúa cuanto afecta añadir peso extra al Inspire 1. La curva fundamentada en pruebas de campo resulta como se ve en la Figura 4.21. De acuerdo al método de ajuste de curvas por “regresión” un parámetro de calidad de ajuste es el coeficiente de correlación  $R^2$  entre valores X, Y. R (raíz de  $R^2$ ) varía entre -1 y 1 y cuando se aproxima decimos que el modelo lineal es adecuado para describir los datos experimentales. De ser  $R = 0$ , entonces los pares X,Y no tienen correlación alguna entre ellos y no se puede describir el comportamiento de un fenómeno por un modelo de función lineal. [67]. Aquí  $R^2 = 0,9631$ .

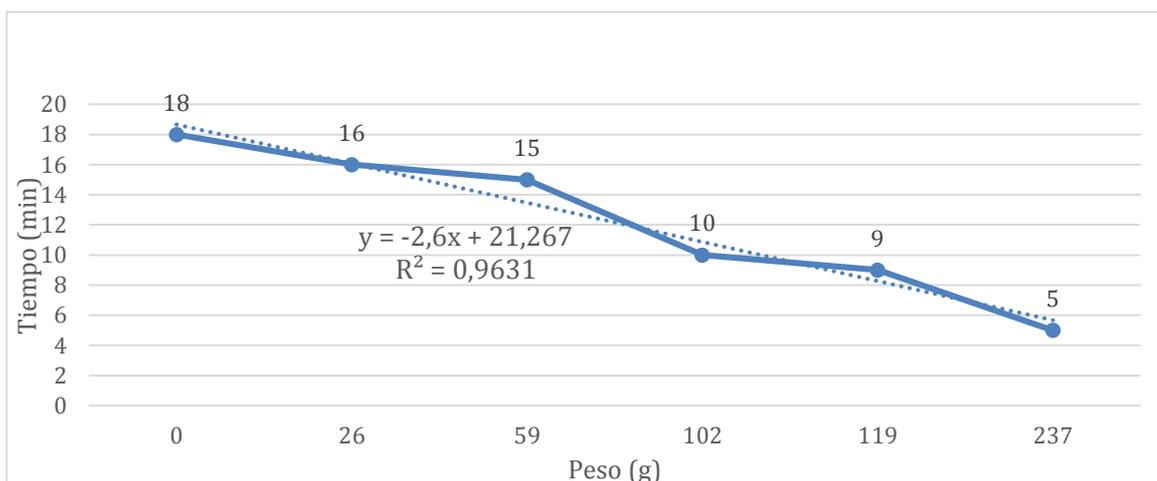


Figura 4.21 Curva de autonomía de vuelo vs peso.  
Fuente: Autores.

La autonomía de vuelo del Inspire 1 al montar el dispositivo completo se ve afectada en un 44%. De 18min dado por el fabricante se reduce a 9:21min (ver Figura 4.22). Este UAV no está diseñado para cargar peso extra.

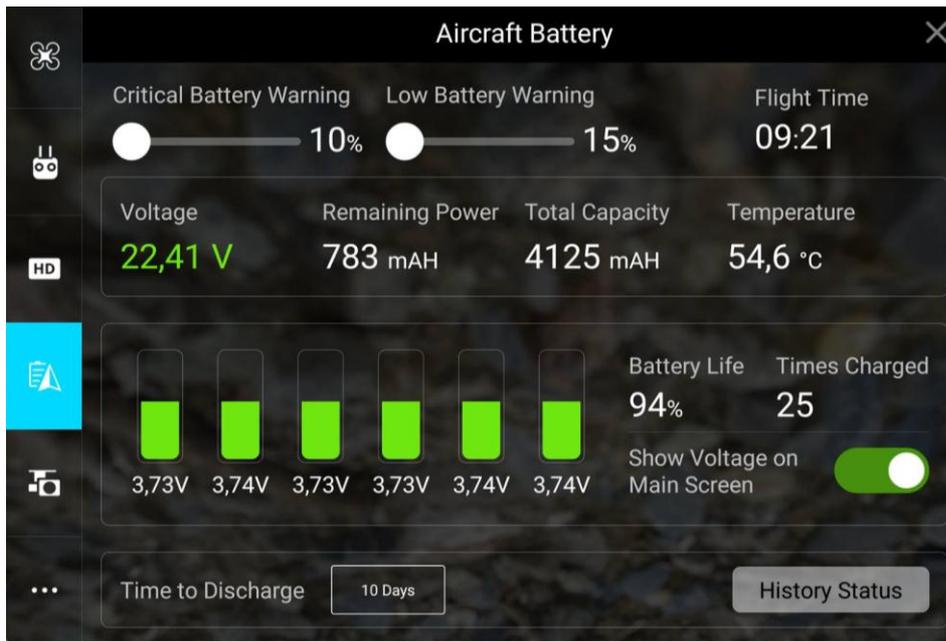


Figura 4.22 Autonomía de vuelo con el sistema montado. Interfaz DJI GO.  
Fuente: Autores.

En la Figura 4.23 se especifica el peso de los distintos componentes a ser montados en el UAV.

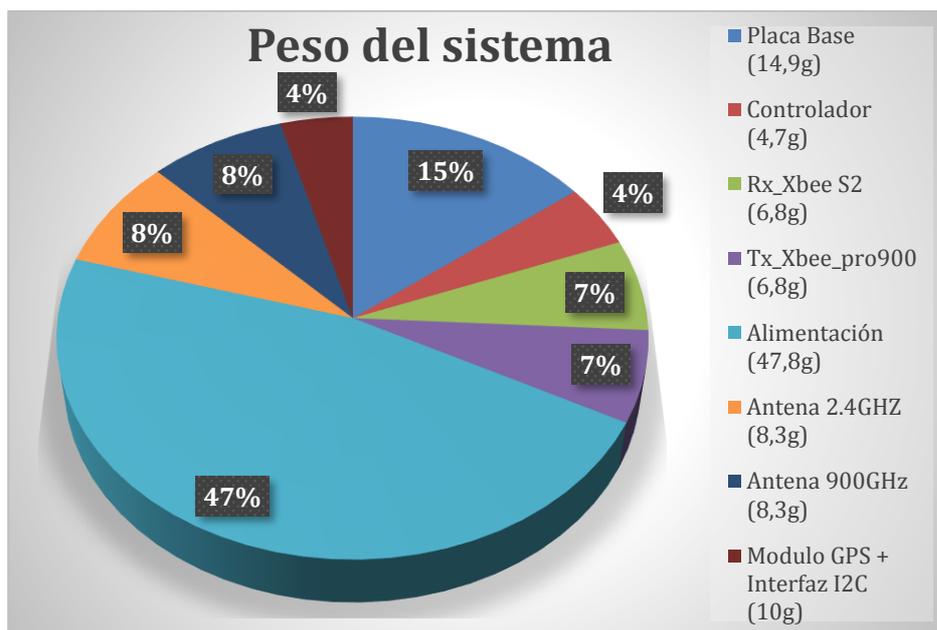


Figura 4.23 Detalle de pesos  
Fuente: Autores.

#### 4.1.7 Prueba 2: tamaño máximo de carga útil (Payload).

En la Figura 4.24 se ve la respuesta del módulo XBee frente al comando AT\_NP. El valor FF o 255 es el máximo número de bytes que se pueden enviar.

➔	8	19:53:12.748	4	AT Command	<b>Status</b> 00 (Status OK) <b>Response</b> 00 FF
➜	9	19:53:12.779	7	AT Command Response	

Figura 4.24 Respuesta al comando AT\_NP sobre valor máximo de Trama.  
Fuente: Autores.

Es decir todos los datos recolectados deben enviarse dentro de esa capacidad. La librería “xbee.h” establece este tamaño de paquete en 110 bytes incluidos 16 bytes de la dirección destinatario y 8 bytes de la dirección corta. El máximo Payload probado en transmisión es de 92 caracteres, un cada carácter por byte (ver Figura 4.25).

```
PAYLOAD...
abcdefg_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90ab
abcdefg_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90ab
abcdefg_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90ab
abcdefg_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90ab
abcdefg_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90ab
```

Figura 4.25 Prueba de tamaño de trama de 92 caracteres.  
Fuente: Autores.

El software XCTU recomienda no exceder a 84 caracteres pues en recepción imposibilita su parseado. Con algunas modificaciones en la librería se logra construir tramas de hasta 200 caracteres sin obtener fallas en recepción ni cortes (ver Figura 4.26). Sumando todas las variables recolectadas, coordenadas de GPS, fecha y hora de RTC y RSSI de la señal recibida se concreta el uso de 98 caracteres.

```
0abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100abcdef_110abcdef_120abcdef_130abcdef_140abcdef_150abcdef_160abcdef_170abcdef_180abcdef_190abcdef_200
0abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100abcdef_110abcdef_120abcdef_130abcdef_140abcdef_150abcdef_160abcdef_170abcdef_180abcdef_190abcdef_200
0abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100abcdef_110abcdef_120abcdef_130abcdef_140abcdef_150abcdef_160abcdef_170abcdef_180abcdef_190abcdef_200
0abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100abcdef_110abcdef_120abcdef_130abcdef_140abcdef_150abcdef_160abcdef_170abcdef_180abcdef_190abcdef_200
0abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100abcdef_110abcdef_120abcdef_130abcdef_140abcdef_150abcdef_160abcdef_170abcdef_180abcdef_190abcdef_200
0abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100abcdef_110abcdef_120abcdef_130abcdef_140abcdef_150abcdef_160abcdef_170abcdef_180abcdef_190abcdef_200
```

Figura 4.26 Prueba de Payload de hasta 200 caracteres sin inconvenientes en recepción.  
Fuente: Autores.

Así el nuevo máximo de trama es 237 bytes. Existe la opción de parsear una trama para lograr envíos de 200 caracteres de 100 en 100. En la Figura 4.27 se distingue que aunque hay

separación de tiempo entre envío de 1s. Cuando coinciden en la llegada no se pierde y tienen el mismo tiempo de llegada.

```
PAYLOAD...
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:21;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:22;
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:23;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:24;
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:24;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:25;
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:25;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:26;
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:26;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 42:27;
```

Figura 4.27 Parcialización de trama como medio para aumentar el tamaño de Payload.  
Fuente: Autores.

#### 4.1.8 Prueba 3: frecuencia de envío de datos por nodo.

Los nodos remotos recogen muestras cada 10 min. Se prueba el envío de 6 tramas cada hora. En dicha prueba se logra determinar que con 300ms de separación entre trama no existe problemas en la recepción. En la Figura 4.28 se muestra la sección de código que realiza esto. En misma se distingue que entre todas las tramas que llegan suman 38ms. Por efecto de depuración de código se sub-escala a muestreos de 3s y envíos de 19s.

```

*5#;8/4/2016;15:53:14;25.5;52.2;25.4;52.5;25.3;78.9;878.2;0.0;270;24
if (millis() - lastSend >= tiempo_envio) { Tiempo de Carga de tramas:
  cont10min = 0;                               6 ms
  envio(medidas1);                             *5#;8/4/2016;15:53:19;25.5;52.2;25.4;52.4;25.3;78.9;878.2;0.0;270;24
  delay(300);                                  Tiempo de Carga de tramas:
  envio(medidas2);                             7 ms
  delay(300);                                  *5#;8/4/2016;15:53:24;25.5;52.2;25.4;52.3;25.3;78.9;878.2;0.0;270;24
  envio(medidas3);                             Tiempo de Carga de tramas:
  delay(300);                                  6 ms
  envio(medidas4);                             *5#;8/4/2016;15:53:29;25.5;52.2;25.4;52.2;25.4;78.9;878.2;0.0;270;24
  delay(300);                                  Tiempo de Carga de tramas:
  envio(medidas5);                             6 ms
  delay(300);                                  *5#;8/4/2016;15:53:34;25.5;52.4;25.4;52.2;25.3;78.9;878.2;0.0;270;24
  envio(medidas6);                             Tiempo de Carga de tramas:
  lastSend += tiempo_envio;                   6 ms
                                              *5#;8/4/2016;15:53:39;25.5;52.2;25.4;52.2;25.3;78.9;878.2;0.0;270;24
                                              Tiempo de Carga de tramas:
                                              7 ms

```

Figura 4.28 Error de código producido por una separación temporal inferior a 300ms.  
Fuente: Autores.

En la Figura 4.29 se muestra la recepción con separación entre tramas inferior a los 300ms. Nótese que se producen un error de código 3 o llegada de un carácter inesperado. Probablemente la trama en proceso es cortada por la entrante.

```

*5#;8/4/2016;14:58:59;25.2;53.5;24.9;54.4;25.5;78.9;878.8;1.8;270;24
Tiempo de Carga de tramas:
6 ms
*5#;8/4/2016;14:59:4;25.3;53.5;25.0;54.3;25.5;78.9;878.7;0.9;270;24
Tiempo de Carga de tramas:
24 ms
*5#;8/4/2016;14:59:9;25.3;53.4;25.0;54.2;25.5;78.9;878.7;0.9;270;24
Tiempo de Carga de tramas:
41 ms
Error de codigo:3
*5#;8/4/2016;14:59:24;25.3;53.4;25.0;54.1;25.5;78.9;878.7;1.4;270;24
Tiempo de Carga de tramas:
5 ms
*5#;8/4/2016;14:59:29;25.3;53.4;25.0;54.1;25.5;78.9;878.7;1.4;270;24
Tiempo de Carga de tramas:
26 ms
*5#;8/4/2016;14:59:34;25.3;53.4;25.0;54.1;25.5;78.9;878.7;0.9;270;24
Tiempo de Carga de tramas:
39 ms
Error de codigo:3

```

Figura 4.29 Error de código producido por una separación temporal inferior a 300ms.  
Fuente: Autores.

#### 4.1.9 Prueba 4: frecuencia de envío de datos entre nodo.

La separación temporal entre de nodos remotos se entiende por aquella en la que los envíos tendrán un intervalo de tiempo donde no existe colisión de paquetes. De esta manera bajo pruebas de laboratorio y dado que el protocolo ZigBee es “Half-Duplex” se prueba enviar datos simultáneamente con intervalos de entre 1 hasta de 2s sin tener mayor inconveniente de colisión (ver Figura 4.30).

```

PAYLOAD
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:42;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:43;
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:45;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:45;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:45;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:46;
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:47;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:47;
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:48;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:48;
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:49;
NODO2_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:49;
NODO1_a_10abcdefg_20abcdefg_30abcdefg_40abcdefg_50abcdefg_60abcdefg_70abcdefg_80abcdefg_90abcdef_100 -- 3:50;

```

Figura 4.30 Pruebas de envío de tramas con separación temporal de un segundo.  
Fuente: Autores.

Nótese que en el segundo 45 llegan 3 tramas, por lo que se deduce: contar con la capacidad de recepción de hasta 3 tramas en el mismo segundo. En la separación espacial no se concibe el inconveniente de la colisión de paquetes dado que se considera a cada nodo remoto como único en la topología.

## 4.2 Prueba de campo

De acuerdo al escenario definido en las pruebas de laboratorio ( $4^{\circ}0'6.18''S$ ,  $79^{\circ}13'49.44''O$ ), que puede disminuir en la Figura 4.32. Las pruebas de campo se realizan en el mes de enero, la temperatura ambiente y velocidad de viento están a  $23^{\circ}C$  y  $7km/h$  respectivamente. Según la herramienta “El Tiempo” Microsoft Windows. A una altitud de 2180msnm.



Figura 4.31 Escenario de pruebas de campo.

Fuente: Autores.

Se usa herramientas como XCTU para realizar “test de rango” y medir el nivel de señal RSSI. Resulta necesario el monitor serial del IDE Arduino. Además se corre la aplicación de monitoreo con la intención de depurar posibles errores. Los equipos utilizados mantienen las características presentadas en las simulaciones. Cada experimento se repite en varias ocasiones en expectativa del peor de los escenarios.

### 4.2.1 Prueba 1: test de rango en estado vinculado

En este experimento se trabaja con XBee S2 de 2mW de potencia de transmisión. Las antenas son de 2dBi con polarización horizontal y altura de 3m. Se mide niveles de señal en función de la variación de distancia. Los dispositivos se mantienen emparejados mientras se realizan los test. Un nodo coordinador (ubicado en  $-4^{\circ}0'8,2129''$ ;  $-79^{\circ}13'49,1943''$ ) dista del ED por 37m. A esta distancia el RRSSI es  $-78dBm$  (ver Figura 4.32).



Figura 4.32 Ubicación y test de rango a 37m en estado vinculado.  
Fuente: Autores.

Por conveniencia se resumen los distintos test. En la Figura 4.33 se muestra el último de ellos. El nodo coordinador cambia de coordenadas, esta vez la distancia de separación es 414m.



Figura 4.33 Ubicación y test de rango a 414m en estado vinculado.  
Fuente: Autores.

Aunque no es un valor estable el nivel de señal RSSI es un indicador de la calidad de enlace. El fabricante recomienda mantener un nivel de señal local entre -26dBm a -92dBm (para enlaces estáticos) [47] [48]. En la Figura 4.34 vemos la curva nivel de señal en función de la distancia obtenida de distintas mediciones. Vale aclarar que los módulos de comunicación se encuentran emparejados y no se dan la tarea de buscar canales libres, no extienden acuses de recibos, no ejecutan protocolos anticolidión de paquetes. En las arquitecturas de recolección o repetición: los módulos de comunicación tendrán que emparejarse cuando el nodo móvil sobrevuele el área de cobertura del nodo remoto. En este punto se recomienda

vincular los dispositivos para que creen tablas de enrutamiento que faciliten la tarea de encontrar un módulo remoto.

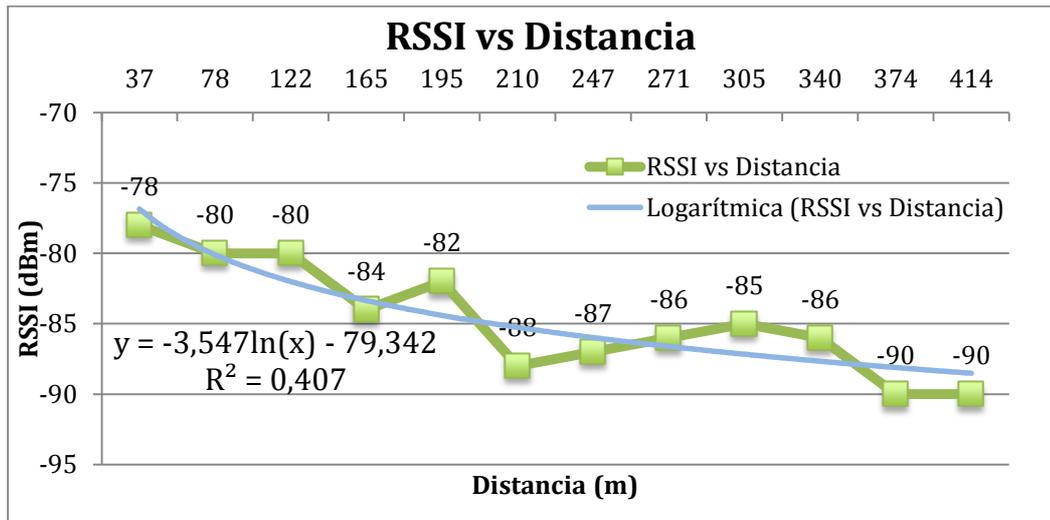


Figura 4.34 RSSI vs Distancia. Los dispositivos se mantienen emparejados.  
Fuente: Autores.

Como se esperaba el nivel de señal recibida va disminuyendo con respecto a la distancia, pero no linealmente.

#### 4.2.2 Prueba 2: test de rango entre módulos no emparejados.

Se procede a buscar un dispositivo remoto a una distancia. El tráfico de paquetes no debe tener pérdidas. El primer test de rango se realiza a una distancia de 18m (con altura de las antenas de 3m, polarización horizontal, ganancia de 2dBi y potencia de transmisión 2mW). Se busca al dispositivo hasta lograr establecer comunicación. El coordinador se encuentra geolocalizado en  $-4,00838$ ;  $-79,22933^\circ$ . El nivel de señal obtenido es  $-73\text{dBm}$  (ver Figura 4.35).



Figura 4.35 Test de rango a 18m del nodo remoto.  
Fuente: Autores.

En el último test de rango se dista entre dispositivos en 180m, se obtiene -83 dBm. En este punto aún no existe pérdida de paquetes (ver Figura 4.36). Lo que hace pensar que al pasar el nodo móvil a esa distancia en vertical y a una velocidad mínima se lograría establecer el enlace. Los demás test se resumen en la Figura 4.37.

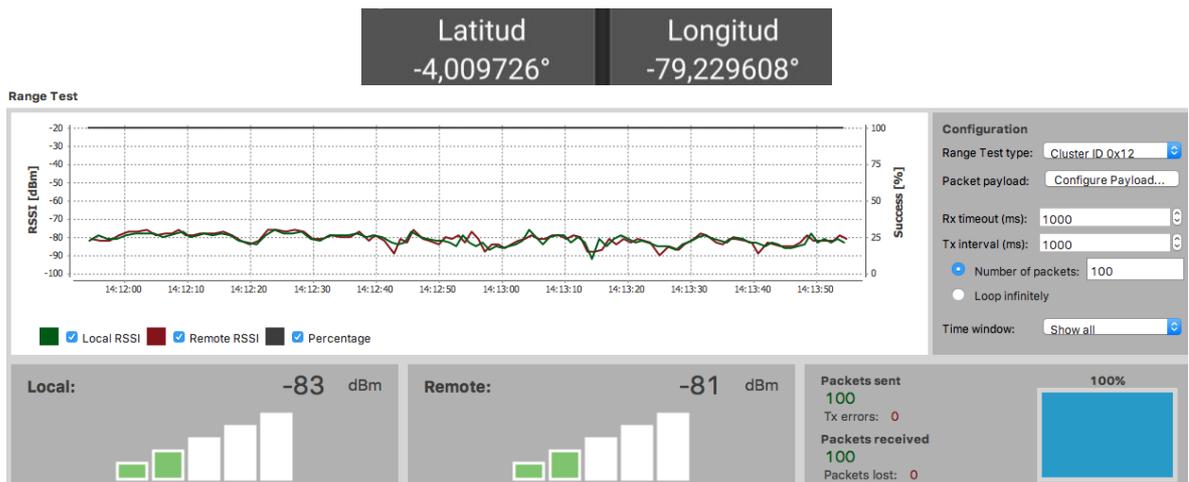


Figura 4.36 Ubicación y test de rango en 180m.  
Fuente: Autores.

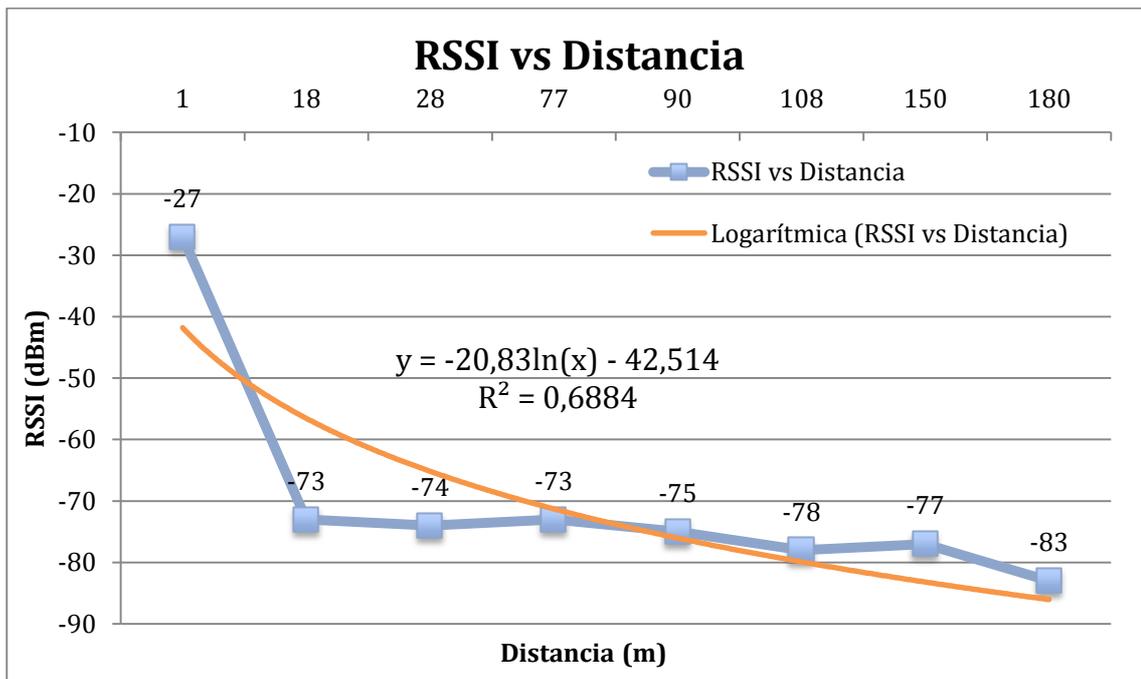


Figura 4.37 RSSI vs Distancia.  
Fuente: Autores.

#### 4.2.3 Prueba 3: test de altura. Antenas dipolo de 2dBi.

Se obtiene la altura donde el tráfico de tramas es estable (test de rango sin pérdida de paquetes). El nodo remoto tiene una antena dipolo de 2dBi polarizada verticalmente a 3m con respecto del suelo. De acuerdo al patrón de radiación de un dipolo (toroidal) se espera obtener

resultados similares a los de la prueba 2. El nodo coordinador esta acoplado en el UAV (ver Figura 4.38). La interfaz DJI GO servirá como instrumento de medición de la altura.

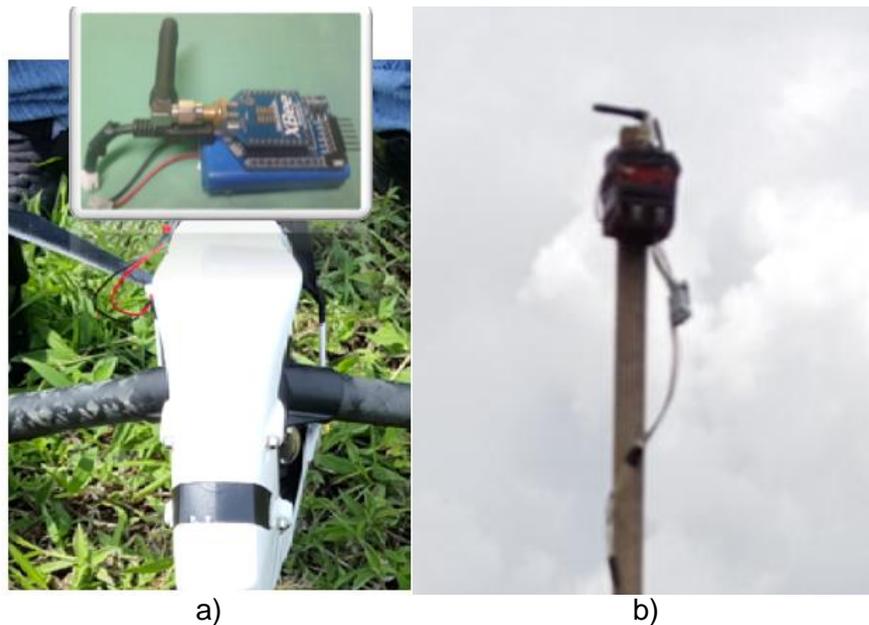


Figura 4.38 a) Test de rango nodo móvil – estación. b) Antena dipolo 2 dBi.  
Fuente: Autores.

Se procedió a realizar test de rango a diferentes alturas (ver Figura 4.39). Para comprobar la altura máxima que se podría alcanzar a recibir datos el nodo móvil. En la prueba se mantiene fijo a una determinada altura.



Figura 4.39 Alturas tomadas de la interfaz DJI GO a las cuales se hizo medidas de RSSI.  
Fuente: Autores.

En las Figuras 4.40 y 4.41 se ven los test de rango a 15m y 50m respectivamente. Los demás valores obtenidos de los otros test de rango se resumen en la gráfica 4.42. Bajo estas condiciones, hasta 50m de altura aún se mantenía el enlace.

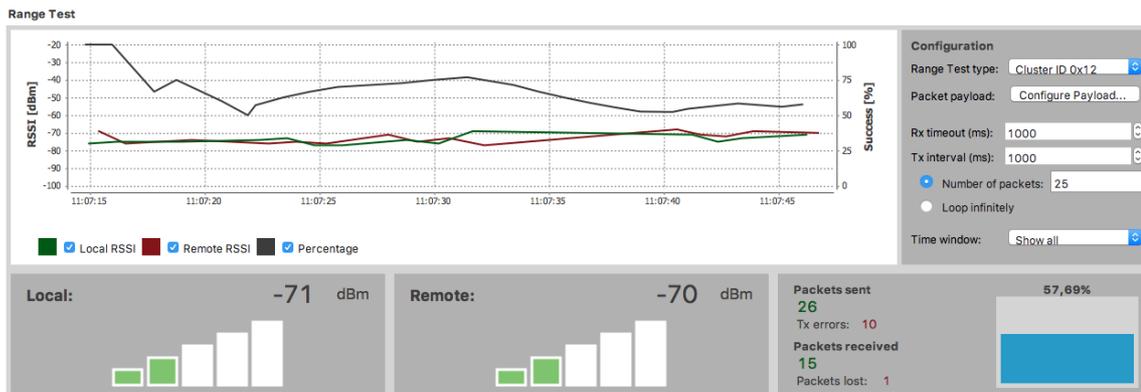


Figura 4.40 Test de rango a 15m de altura  
Fuente: Autores.

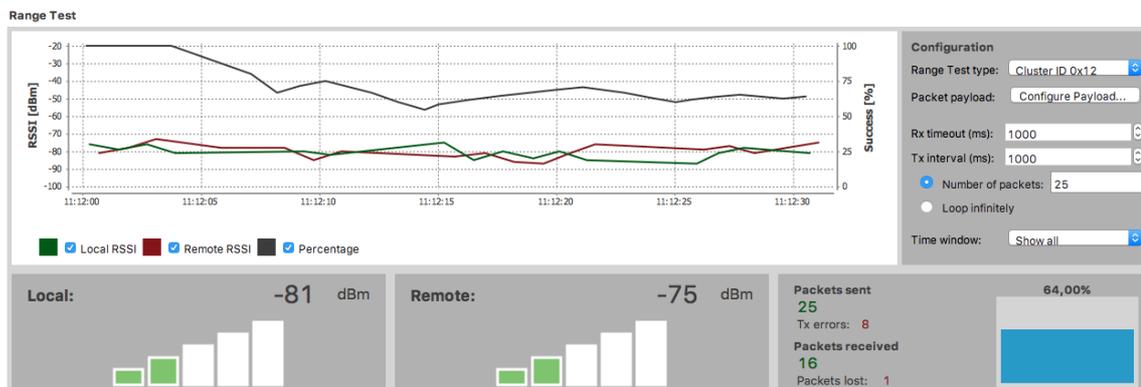


Figura 4.41 Test de rango a 50m de altura  
Fuente: Autores.

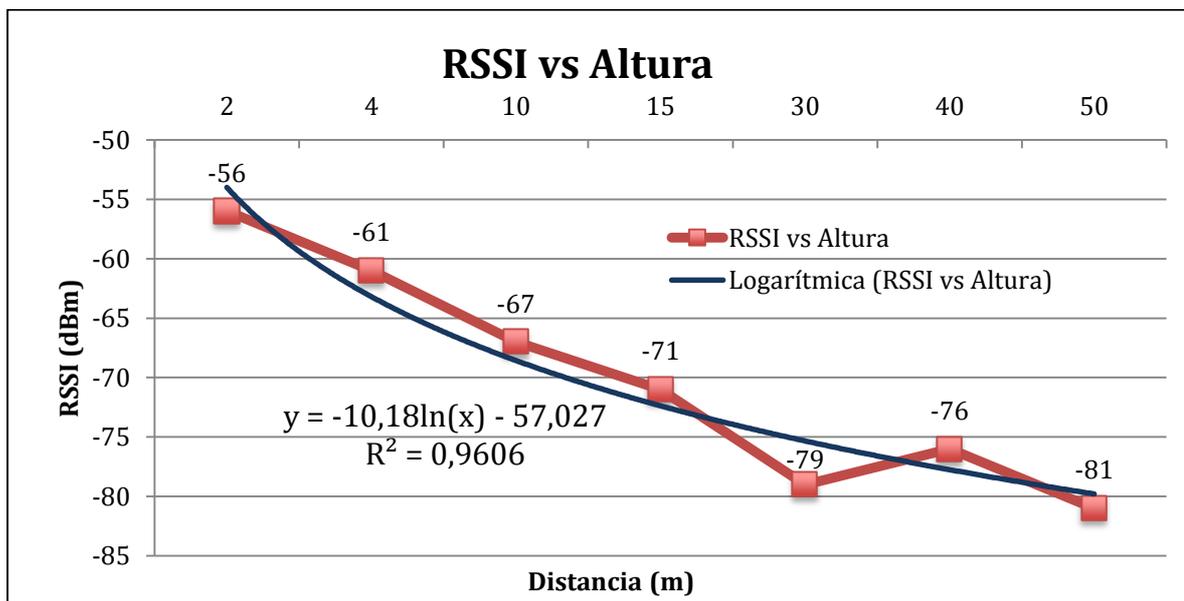


Figura 4.42 RSSI vs Altura  
Fuente: Autores.

#### 4.2.4 Prueba 4: test de altura. Antenas dipolo de 5dBi

Como prueba final se realiza el test de rango manteniendo las condiciones anteriores excepto en la antena del nodo remoto la cual fue reemplazada por un dipolo de 5dBi (ver Figura 4.40). Logrando así un enlace a mayor altura (ver Figura 4.41).



Figura 4.43 Test de rango nodo móvil-estación. Antenas dipolo. Polarización vertical.

Fuente: Autores.



Figura 4.44 Alturas tomadas de la interfaz DJI GO a las cuales se hizo medidas de RSSI.

Fuente: Autores.

Con alturas superiores a 61m ya experimenta errores en transmisión. De 25 paquetes enviados 19 son recibidos lo cual indica un éxito de 76% (ver Figura 4.45).

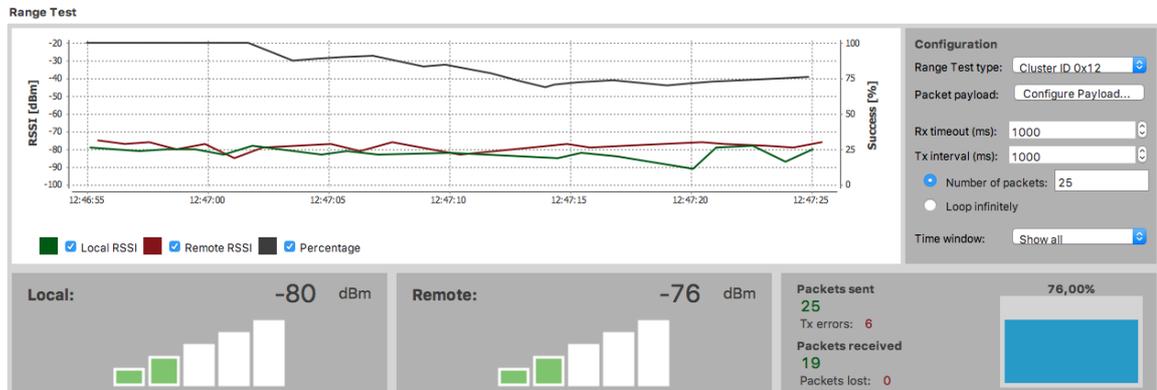


Figura 4.45 Test de rango 61m.  
Fuente: Autores.

Los demás valores obtenidos de los otros test de rango se resumen en la Figura 4.46.

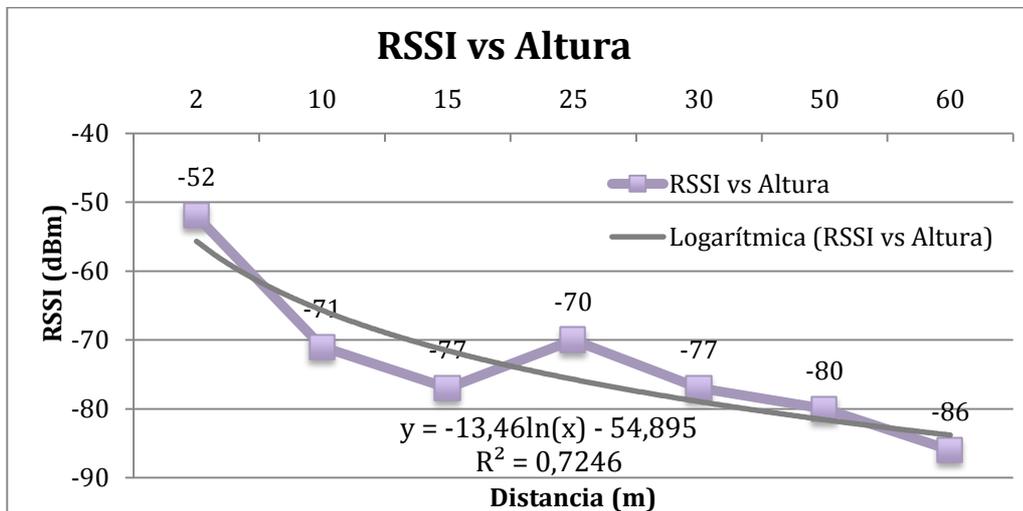


Figura 4.46 RSSI vs Altura con antena dipolo de 5 dBi.  
Fuente: Autores.

#### 4.2.5 Prueba 5: funcionalidad del sistema completo. Cobertura.

Se realiza pruebas con el nodo remoto, móvil y base. En todos los nodos se usa un módulo XBee S2 y antenas de 2dBi con polarización horizontal. La altura de las antenas del nodo remoto y base es 3m (ver Figura 4.47).

Para poder definir la altura y área de cobertura, es necesario constatar que las tramas que se envíen mantengan su continuidad por esto se sobrevuela el área cercana al nodo remoto.



Figura 4.47 Actores para la prueba de las arquitecturas RECDAT y REPDAT.  
Fuente: Autores.

En la Figura 4.48 b) se muestra el archivo .csv obtenido por el nodo móvil RECDAT. Se puede constatar las transmisiones realizadas por el nodo remoto cada 30 minutos de las muestras tomadas cada 5 minutos. En dicho archivo se ve como se agrega datos de GPS y RSSI además de las variables meteorológicas.

```

-----a punto de enviar-----
~0 }3@vuh*5#9/4/2016;7:9:9;17.3;77.5;19.7;69.3;16.7;78.9;871.9;1.4;180;94r~Q }3
muestra2: *5#9/4/2016;7:44:19;17.3;77.6;19.9;68.5;16.7;78.9;871.9;5.0;180;94
muestra3: *5#9/4/2016;7:49:24;17.3;77.8;19.9;68.2;16.8;78.9;872.0;4.9;180;94
muestra4: *5#9/4/2016;7:54:29;17.3;77.8;20.0;68.1;16.8;78.9;872.0;4.4;180;93
muestra5: *5#9/4/2016;7:59:34;17.3;77.8;20.0;67.9;16.8;78.9;871.9;3.2;180;94
muestra6: *5#9/4/2016;8:4:4;17.3;77.6;20.0;67.8;16.8;78.9;872.0;4.4;180;94
-----a punto de enviar-----
~Q }3@vuh*5#9/4/2016;7:39:14;17.3;77.6;19.8;68.6;16.8;78.9;872.0;3.3;180;94 ~Q ]
muestra2: *5#9/4/2016;8:14:14;17.3;77.5;20.1;67.7;16.7;78.9;871.9;4.7;180;94
muestra3: *5#9/4/2016;8:19:19;17.5;77.5;20.1;67.5;16.8;78.9;872.0;3.4;180;93
muestra4: *5#9/4/2016;8:24:9;17.5;77.5;20.2;67.3;16.7;78.9;872.0;2.3;180;94
muestra5: *5#9/4/2016;8:29:14;17.3;77.4;20.2;67.2;16.7;78.9;871.9;0.9;180;93
muestra6: *5#9/4/2016;8:34:9;17.5;77.5;20.2;67.1;16.7;78.9;871.9;0.9;180;93
-----a punto de enviar-----
~Q }3@vuh*5#9/4/2016;8:10:10;17.3;77.5;20.0;67.8;16.8;78.9;872.0;4.4;180;94i~Q
muestra2: *5#9/4/2016;8:44:19;17.5;77.4;20.2;67.1;16.8;78.9;872.0;1.9;180;94
muestra3: *5#9/4/2016;8:49:24;17.5;77.5;20.3;67.0;16.8;78.9;872.0;1.4;180;94
muestra4: *5#9/4/2016;8:54:29;17.5;77.4;20.3;66.9;16.8;78.9;871.9;1.4;180;93
muestra5: *5#9/4/2016;8:59:34;17.5;77.4;20.3;66.8;16.8;78.9;872.0;1.3;180;94
muestra6: *5#9/4/2016;9:4:4;17.5;77.4;20.4;66.7;16.8;78.9;872.0;1.4;180;94

```

a)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
5	09/04/2016	7:44:19	17.3	77.6	19.9	68.5	16.7	78.9	871.9	5.0	180	94	-3.999.840	-79.231.728	2243	-68
5	09/04/2016	7:49:24	17.3	77.8	19.9	68.2	16.8	78.9	872.0	4.9	180	94	-3.999.844	-79.231.705	2243	-66
5	09/04/2016	7:54:29	17.3	77.8	20.0	68.1	16.8	78.9	872.0	4.4	180	93	-3.999.844	-79.231.705	2243	-67
5	09/04/2016	7:59:34	17.3	77.8	20.0	67.9	16.8	78.9	871.9	3.2	180	94	-3.999.844	-79.231.705	2243	-70
5	09/04/2016	8:04:04	17.3	77.6	20.0	67.8	16.8	78.9	872.0	4.4	180	94	-3.999.837	-79.231.689	2240	-71
5	09/04/2016	8:10:10	17.3	77.5	20.0	67.8	16.8	78.9	872.0	4.4	180	94	-3.999.865	-79.231.667	2236	-58
5	09/04/2016	8:14:14	17.3	77.5	20.1	67.7	16.7	78.9	871.9	4.7	180	94	-3.999.865	-79.231.667	2236	-62
5	09/04/2016	8:19:19	17.5	77.5	20.1	67.5	16.8	78.9	872.0	3.4	180	93	-3.999.865	-79.231.674	2237	-53
5	09/04/2016	8:24:09	17.5	77.5	20.2	67.3	16.7	78.9	872.0	2.3	180	94	-3.999.865	-79.231.674	2237	-58
5	09/04/2016	8:29:14	17.3	77.4	20.2	67.2	16.7	78.9	871.9	0.9	180	93	-3.999.865	-79.231.674	2237	-60
5	09/04/2016	8:34:09	17.5	77.5	20.2	67.1	16.7	78.9	871.9	0.9	180	93	-3.999.876	-79.231.682	2238	-65
5	09/04/2016	8:41:16	17.5	77.4	20.1	67.1	16.7	78.9	871.9	1.5	180	93	-3.999.807	-79.231.339	2175	-73
5	09/04/2016	8:44:19	17.5	77.4	20.2	67.1	16.8	78.9	872.0	1.9	180	94	-3.999.807	-79.231.339	2175	-71
5	09/04/2016	8:49:24	17.5	77.5	20.3	67.0	16.8	78.9	872.0	1.4	180	94	-3.999.807	-79.231.339	2175	-68
5	09/04/2016	8:54:29	17.5	77.4	20.3	66.9	16.8	78.9	871.9	1.4	180	93	-3.999.796	-79.231.346	2174	-70
5	09/04/2016	8:59:34	17.5	77.4	20.3	66.8	16.8	78.9	872.0	1.3	180	94	-3.999.796	-79.231.346	2174	-65
5	09/04/2016	9:04:04	17.5	77.4	20.4	66.7	16.8	78.9	872.0	1.4	180	94	-3.999.789	-79.231.346	2174	-66

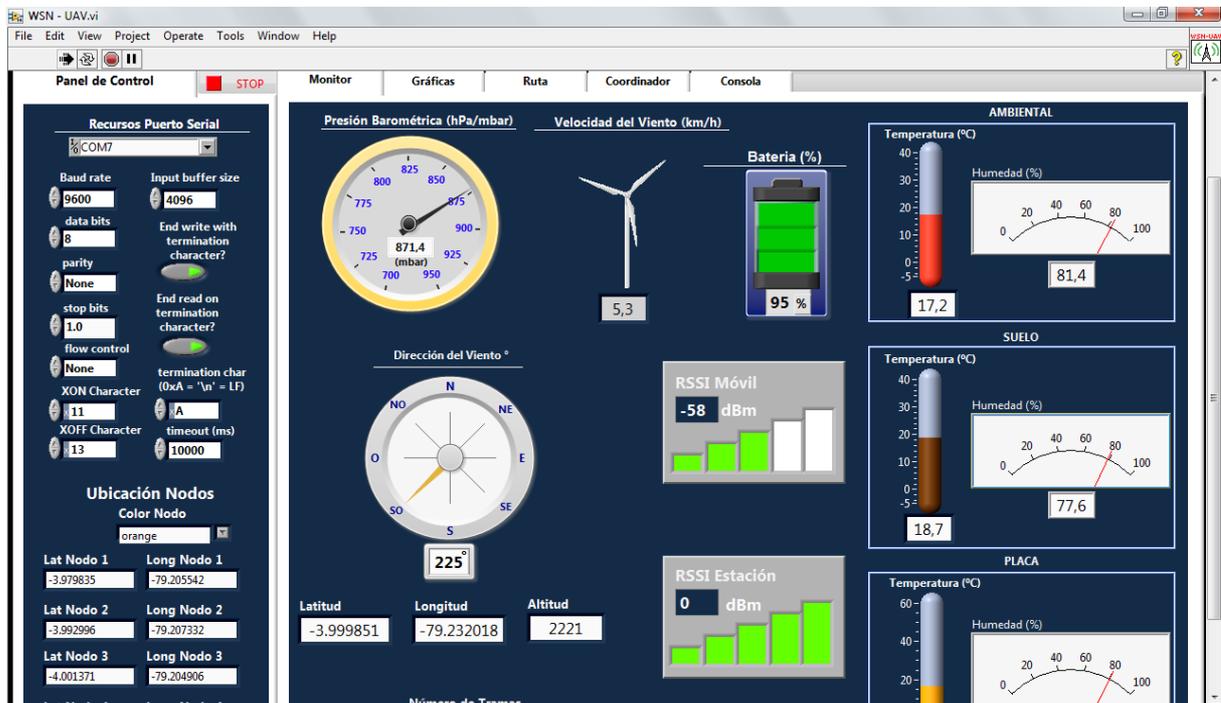
b)

Figura 4.48 Pruebas con el sistema RECDAT. a) Transmisiones del nodo remoto. b) Archivo data.csv del nodo móvil.

Fuente: Autores.

En la Figura 4.49 a) se ve la retransmisión de datos por el nodo móvil en RECDAT provenientes del nodo remoto. Se verifica los valores enviados cada 30 min de las muestras tomadas cada 5 min. En este caso también se añaden valores de GPS de la ruta de recorrido del nodo móvil y nivel de señal de los paquetes recibidos.

a)



b)

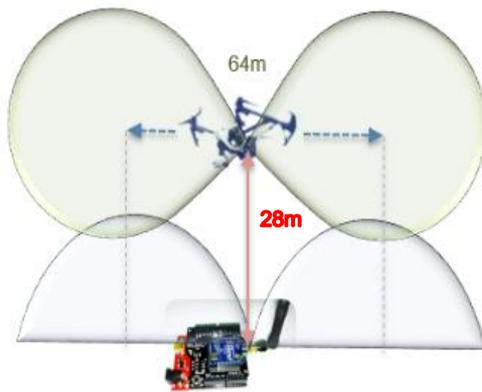
Figura 4.49 Pruebas con el sistema REPDAT. a) Transmisiones del nodo remoto y recepción en la opción consola de a interfaz de usuario. b) Visualización de los valores adquiridos.  
Fuente: Autores.

En la Figura 4.50 a) se ilustra los resultados de la altura máxima a la que se llegó, es de 28m y el radio de cobertura de 32m. Se calcula que a velocidad máxima de 22m/s (especificación del fabricante) en ese radio, durante 1,45s se reciben datos. En ese tiempo no se alcanza a cargar todas las tramas al nodo móvil (sólo se suben 4,35 tramas). Por la existencia de corrientes de viento entre otras variables no se logra llegar a esa velocidad.

Bajo las condiciones anteriores falta alrededor de 2s. Al reducir la velocidad horizontal a 16m/s. tendríamos 2s de recepción suficientes para cargar datos. Pero este valor es crítico. A 5m/s que es la velocidad documentada a la cual se obtuvo tramas, se tendría un periodo de recepción de 6.4s. Con esto podemos afirmar que no se requiere considerar suspender el dron en cada nodo.

Al volar a 5m/s durante 10min se alcanza a recorrer 3km en línea recta, pero hay que considerar el viaje de vuelta. Así que la capacidad de recorrido se establece en 1,5km.

En el caso de que una recolección diaria se requiere cargar 144 tramas (6x24) por nodo. Esto significa al menos 48s para subir datos a una velocidad de 0.67m/s. En este punto se considera suspender el nodo móvil dentro del área de cobertura del nodo remoto.



a)

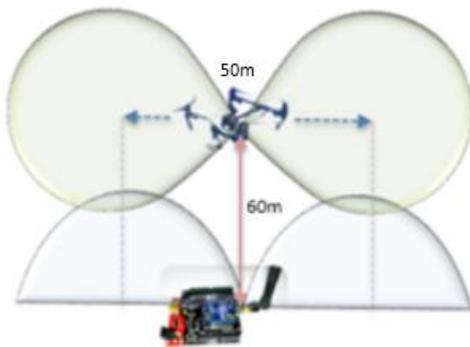


b)

Figura 4.50 a) Distancia y altura del enlace. Dipolos de 2dBi. b) Altura (H) y distancia (D) a la que se ubicó el UAV y se mantenía el enlace.  
Fuente: Autores.

En la Figura 4.51 a) se ilustra los resultados al colocar una antena de 5dBi en el nodo remoto. La altura máxima alcanzada es 60m y la distancia de enlace 50m. Se calcula que a velocidad máxima (22m/s) en ese radio, durante los 2,31s se recepta 6,93 tramas. Esto comprueba que al aumentar el rango de cobertura mejora el tiempo para subir tramas.

A 5m/s se tendría un periodo de carga de 10s. Los valores equivalentes 1 día de muestras (144 tramas) lograrían cargarse al nodo móvil cuando éste viaje a velocidades inferiores de 1m/s.



a)



b)

Figura 4.51 a) Distancia y altura del enlace. Dipolos de 5dBi. b) Altura (H) y distancia (D) a la que se ubicó el UAV y se mantenía el enlace.  
Fuente: Autores.

En la Figura 4.52 y 4.53 se ilustra el sistema y patrones de cobertura de REPDAT y RECDAT en funcionamiento de acuerdo a los resultados obtenidos.

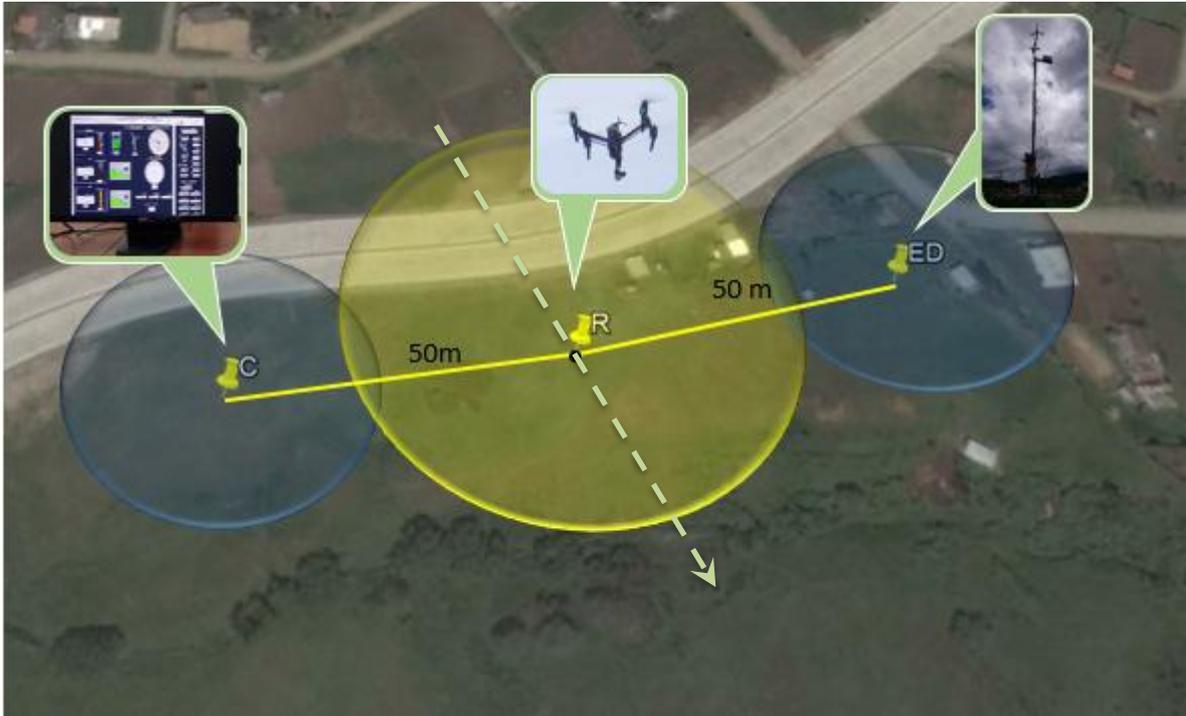


Figura 4.52 Sistema de repetición de datos. XBee S2 y antenas de 5dBi.  
Fuente: Autores.

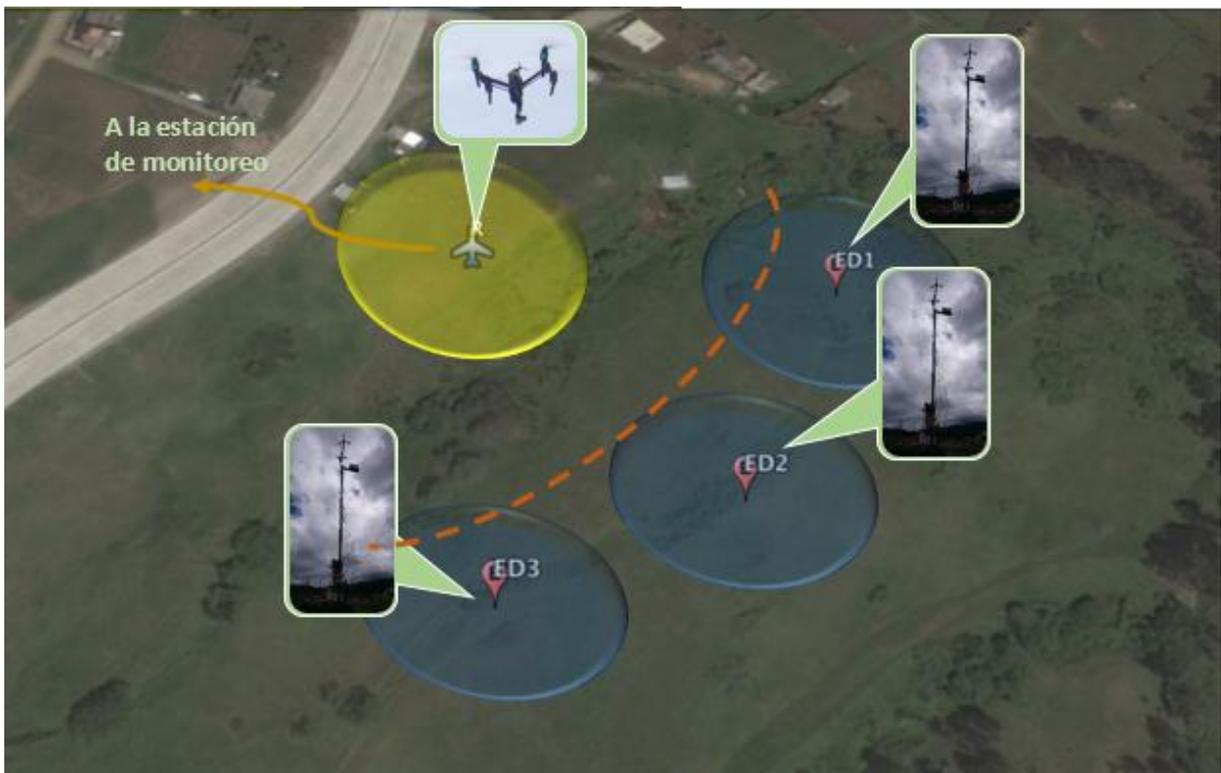


Figura 4.53 Sistema de recolección de datos. XBee S2 y antenas de 5dBi.  
Fuente: Autores

## CONCLUSIONES

- En este trabajo se diseña, implementa y evalúa un prototipo que permite obtener información en tiempo diferido de sensores remotos. Combinando los conceptos de WSN y UAV se logra implementar dos arquitecturas REPDAT y RECDAT brindando una autonomía de 53h.
- El resultado de la optimización del hardware implementado en el nodo móvil consigue un peso entre componentes de 102g definiendo una autonomía de vuelo de 9,3min que significa una reducción del 44% de la autonomía nominal establecida por el fabricante (18min).
- Al realizar la curva peso añadido contra autonomía de vuelo del Inspire 1 en la sección 4.1.6., se muestra un  $R^2$  cercano a 1. Es decir, un modelo de función lineal ( $y = -2,6x + 21,267$ ) se adecua para definir este comportamiento. La función lineal posee una pendiente negativa, lo que es evidente dado que por cada 13g de peso añadido se disminuye 1 min de autonomía.
- El prototipo implementado para la arquitectura REPDAT usa los mismos componentes de hardware que RECDAT. Esto es muy conveniente dado que con el mismo hardware se puede ejecutar las dos arquitecturas propuestas (previo la programación del firmware).
- La memoria de almacenamiento o FLASH y la memoria dinámica para los diferentes actores de red se distribuyen como sigue: cada nodo remoto ocupa 60% y 50%, el firmware RECDAT 67% y 72%, el firmware REPDAT 33% y 46% y el gateway de la estación base 20% y 22% respectivamente. Lo cual reafirma el criterio de elección del ATmega-328P para la implementación del sistema, este microcontrolador posee 32kB para memoria FLASH y 2kB de memoria dinámica SRAM.
- Dado que el sistema en RECDAT recoge datos de nodos distanciados, la separación temporal resulta relativa. Cada nodo remoto se considera como único y mantiene un enlace punto a punto con el nodo móvil. De esta manera el resultado obtenido en las pruebas de campo sería similar para el número de nodos remotos dispuestos en la topología de red. En este caso se calcula que al volar a una velocidad horizontal de 5m/s y con una autonomía de 10min se cubriría una distancia en línea recta de 1.5km (3km considerando ida y vuelta).

- Sea una separación temporal o espacial entre nodos remotos, estos se consideran como únicos elementos a enlazarse con el nodo móvil. Por tal razón la topología idónea es en estrella.
- El estándar que gestiona el acceso al medio, así como la capa de red seleccionado es IEEE 802.15.4 ZigBee. Para las pruebas de campo se elige el modelo S2 que de acuerdo a características de potencia (2mW), ganancia de antenas (2dBi), tasa de transferencia de datos (250kbps) y consumo (40mA) resulta menos favorable en comparación a modelos XBee S2 PRO y XBee Pro-900 (ver Tabla 3.4).
- La base de estas pruebas se fundamenta en los resultados obtenidos por medio de antenas omnidireccionales. Aunque se mantenga el mismo plano de polarización lineal entre nodos fijos (remoto y base), las vibraciones producidas por el flujo de viento ocasionan una desalineación en la dirección de polarización del nodo móvil. La variable de radio de cobertura hace referencia a una polarización vertical y la variable altura de vuelo a una polarización horizontal. Se asume completar las pruebas con una polarización horizontal para ganar una mayor área para intersectar datos transmitidos.
- A medida que se aumenta la velocidad de vuelo del UAV se reduce el periodo de recepción de tramas. El rango de cobertura mejora este periodo, como lo demuestran los resultados obtenidos en las secciones 4.2.3 y 4.2.4. Si el nodo móvil supera los 16 m/s el periodo de recepción de tramas resulta ineficiente, ya que sería necesario contar con una tecnología de mayor tasa de transmisión o aumentar la potencia de transmisión para incrementar la cobertura del sistema. Se puede considerar mantener estático el nodo móvil para nodos remotos que estén almacenando una mayor cantidad de datos superiores a las pruebas realizadas y que requieran un tiempo mayor para la transmisión de datos. Esto no se conseguiría en otros sistemas basados como UAVs de ala fija.
- Con antenas de 2dBi y módulo XBee S2, se vinculan el nodo móvil (a una velocidad máxima de 5m/s) al remoto. Se consigue un enlace de hasta 28m de altura y 32m de radio de cobertura probando la arquitectura RECDAT. Para el caso del REPDAT se logra vincular los nodos remoto y móvil bajo las mismas condiciones que para el RECDAT, pero en esta arquitectura se vincula el nodo estación base hasta una distancia máxima de 32 m con respecto al nodo móvil. Con estos resultados no existen pérdida de información y se mantiene la continuidad entre tramas recibidas. Una vez que se vinculan los nodos se pueden llegar a establecer un mayor radio de cobertura

y de altura, como lo demuestran las pruebas realizadas en la sección 4.2.1 y 4.2.2, donde se logra duplicar la distancia del enlace.

- Para realizar la asociación entre módulos de comunicación se ejecutan una serie de comandos por parte del dispositivo que lo requiere. El comando NT (el primero en darse) es una petición del valor del tiempo para poder descubrir el nodo. En este trabajo se mantuvo el valor por default de 6000ms (00 3C) dado que este sería lo máximo que se puede esperar para descubrir otro nodo (AT\_ND) y poder hacer el envío de datos.
- Como trabajo a futuro para mejorar los sistemas propuestos, se debe utilizar un Vehículo Aéreo no Tripulado que permita llevar una mayor carga útil (hardware de mayor capacidad de procesamiento) sin que se vea afectada la autonomía de vuelo y que sea más estable como un UAV de ocho rotores. Se reusaría el sistema de comunicación por telemetría del UAV ahorrando los módulos de comunicación y se mejoraría el aspecto de la retroalimentación entre el nodo remoto al móvil, logrando transmitir y recibir datos bajo petición cuanto el nodo móvil se encuentre dentro de la cobertura del remoto, permitiendo incrementar la velocidad de transmisión.

## RECOMENDACIONES

- La topología recomendada para el sistema recolector es en árbol dado que el nodo móvil se encarga de llevar datos hacia la estación de monitoreo.
- Por otro lado, la topología en estrella es recomendable en un sistema repetidor dado que existirá un único actor en el que converge la topología, dependiendo de este el paso de datos.
- La regulación de voltaje resulta más eficiente entorno al integrado MIC5203-3.3BM5. Este con sólo 1V de variación resulta mejor que los de las series 78xx, LMXXXX o AZXXXX que comercialmente existen en nuestro medio. Por lo que se recomienda usar chips genéricos a este modelo.
- En base a pruebas de laboratorio se establece que la frecuencia máxima de envío por tramas es de 300ms o superior. Se recomienda enviar a razón de 6 trama/s para evitar errores de código en recepción por colisión de paquetes.
- No exceder un payload de más de 120 bytes. Esto referente al control de flujo que se realiza en los firmwares del nodo móvil. Aunque el estándar permite hasta 255 bytes sin contar con los necesarios para armar una trama API 0x10. En las pruebas de laboratorio muestra un corte en la trama de llegada o en errores de código (para reconocer una trama API).
- Los enlaces intrínsecos están basados en antenas dipolo. Al polarizar en vertical se limita en altura de vuelo. Por lo contrario, una polarización netamente horizontal limita el sistema en área de cobertura. Por esto se recomienda el uso de antenas de polarización circular dado que no se requiere ajustar la dirección de polarización modificada por vibraciones.
- Se recomienda actualizar los firmwares de los módulos de radio en versiones 21XX (correspondiente a coordinador API) y 23XX (correspondiente a router API). Las versiones como la 29A7 mantiene por default el “modo sueño” en cíclico. Esto causa que no se localice al dispositivo remoto en su periodo de inactividad y es contraproducente para este tipo de aplicación. Se aclara el uso de las versiones más recientes 21A7 y 23A7 respectivamente.

- Dado que se usa el estándar 802.15.4 ZigBee que basa la gestión de la capa de enlace en el protocolo CSMA/CA, se enfatiza la elección de tecnología que no añadan latencias en el proceso de emparejamiento de módulos de comunicación y ocasionen pérdidas de tramas.
- En la aplicación de recolección de datos para sensores meteorológicos no se recomienda usar UAVs de ala fija, dado que por su velocidad e imposibilidad de control vertical en vuelo estos son destinados en aplicaciones con entornos de áreas amplias, sitios específicos de ascenso y descenso, sistemas de comunicación de mayor tasa y potencia de transmisión con ello antenas de más ganancia, lo cual implica un excedente económico.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Monteros, J., (2015). Diseño de un sistema de video-vigilancia inalámbrica para la ciudad de Cayambe (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- [2] A. A. Kumar Somappa, K. Øvsthus and L. M. Kristensen, "An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks — A Survey of Requirements, Protocols, and Challenges," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 3, pp. 1391-1412, Agosto (2014), [en línea], disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6728782&isnumber=6880447>
- [3] Servicio Móvil Avanzado. "Boletín estadístico del sector de telecomunicaciones". Mayo (2014), [en línea], disponible en: <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/BOLETIN-No.1-SMA.pdf>
- [4] Páez, J., (2011). Diseño de un modelo para evaluación/pruebas del software en base a ingeniería de pruebas aplicando el estándar ISO/IEC 29119 de la empresa OMNISOFTE de la ciudad de Quito (tesis de postgrado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Latacunga, Ecuador.
- [5] Barcelo, M., Correa, A., Lopez, J., Morell, A., "Cooperative interaction among multiple RPL instances in wireless sensor networks, Computer Communications", Diciembre (2015), [en línea], disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2015.12.008>
- [6] Ramírez, J., (2015). Planificación de trayectorias de UAV para recogida de datos de redes de sensores (tesis de pregrado). Universidad de Sevilla. Sevilla, España.
- [7] Daghistani, A., Khalifa, A., Showail, A., Shihada, B., "Green partial packet recovery in wireless sensor networks", Journal of Network and Computer Applications, Volume 58, Diciembre (2015), pp 267-279, [en línea], disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2015.08.006>
- [8] Suneet, G., Pratyay, K., Prasanta, J., "Genetic algorithm approach for k-coverage and m-connected node placement in target based wireless sensor networks, Computers & Electrical Engineering", Noviembre (2015), [en línea], disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compeleceng.2015.11.009>

[9] Espinosa, C., (2015). Adaptación del algoritmo Omega para ser utilizado en un prototipo de red de sensores inalámbrica (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

[10] Alvarez, F., (2015). Implementación de una red de sensores inalámbricos con topología Cluster Tree en el laboratorio de instrumentación industrial (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

[11] Bermudez, A., (2014). Especificaciones de un sistema de monitorización medio ambiental para el lago Titicaca basado en redes inalámbricas de sensores (tesis de postgrado). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

[12] Llanga, D., Cano, D., (2014). Implementación del prototipo para el control de acceso docente mediante la interoperabilidad de WSN y RFID (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

[13] L. M. Flores, C. Dell'Aquila, J. R. Santalucia and C. A. Sistema, "Wireless sensor network for seismic monitoring with Internet access," 2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), pp. 31-34, Octubre (2015), [en línea], disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7400348&isnumber=7400334>.

[14] Escolar, M., "Wireless Sensor Networks: Estado del Arte e Investigación", [en línea], disponible en: [http://www.arcos.inf.uc3m.es/~sescolar/index\\_files/presentacion/wsn.pdf](http://www.arcos.inf.uc3m.es/~sescolar/index_files/presentacion/wsn.pdf)

[15] He, D, (2014). A novel methodology for planning reliable wireless sensor networks (tesis de postgrado). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

[16] Albaladejo, C., (2011). Propuesta de una red de sensores inalámbrica para un sistema de observación costero (tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España.

[17] CISCO. (2014). The Fifth Generation of Wi-Fi Technical White Paper. California, Estados Unidos, CISCO, [en línea], disponible en: [http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white\\_paper\\_c11-713103.html](http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html)

[18] Katz, M., Fitzek, F., (2009). WIMAX Evolution, Emerging Technologies and Applications. Reino Unido. WILEY.

[19] Semtech. Wireless RF Solutions. California, Estados Unidos. Semtech. [en línea], disponible en: [https://www.semtech.com/images/mediacenter/collateral/ism\\_sg.pdf](https://www.semtech.com/images/mediacenter/collateral/ism_sg.pdf)

[20] Cardona, N., Olmos, J., García, M., Monserrat, J., (2011), 3GPP LTE: Hacia la 4G móvil, Barcelona y Valencia, España: Marcombo.

[21] Wang, Ch., Jiang, T., Zhang, Q., (2014), ZigBee Network Protocols and Applications, Florida, Estados Unidos: CRC Press.

[22] IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineer, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer," in IEEE Std 802.15.4e-2012 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2011), vol., no., pp.1-225, Abril (2012), [en línea], disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6185525&isnumber=6185524>

[23] Martínez, R., (2014), Evaluación de características técnicas para la implementación de un sistema automático de trazabilidad de bienes académicos multimedia, basado en estándares inalámbricos, San Salvador, El Salvador: Editorial Universidad Don Bosco.

[24] Loyola, M., Becerra, P., (2015). Manual para la aplicación de la tecnología ZigBee para edificios inteligentes en la ciudad de Cuenca (tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Cuenca, Ecuador.

[25] Firdaus; Ahriman; Akbar, R.; Nugroho, E., @Wireless Sensor Networks for microclimate telemonitoring using ZigBee and WiFi; Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES), IEEE International Conference on, vol., no., pp.200-204, Noviembre (2014), [en línea], disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7024404&isnumber=7024369>

[26] Da Paz, J., (2015). Una red de sensores para las Smart Cities (tesis de postgrado). Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.

[27] Coronel, W., (2015). Diseño e investigación para el ahorro y la automatización de energía en el hogar mediante el zigbee controlado por un dispositivo móvil con sistema operativo Android (tesis de pregrado). Universidad Católica Santiago de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

[28] Cárdenas, Á., Pacheco, F., (2015). Diseño e implementación de un sistema domótico con dispositivos inalámbricos basado en el protocolo zigbee y controlados mediante aplicaciones para dispositivos móviles bajo la plataforma android y computadoras bajo la plataforma Windows (tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca. Cuenca, Ecuador.

[29] Martínez, R., (2014). Análisis y diseño de una red inalámbrica de sensores para un proyecto agrario (tesis de pregrado). Universitat Oberta de Catalunya. Barcelona, España.

[30] Tennina, S.; Koubâa, A.; Daidone, R.; Alves, M.; Jurčik, P.; Severino, R.; Tiloca, M.; Hauer, J.; Pereira, N.; Dini, G.; Bouroche, M.; Tovar, E., (2013), IEEE 802.15.4 and ZigBee as Enabling Technologies for Low-Power Wireless Systems with Quality-of-Service Constraints, Londres, Inglaterra: Springer.

[31] IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirement Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," in IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2006), vol., no., pp.1-203, Septiembre (2007). [en línea], disponible en:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4299496&isnumber=4299495>

[32] Approved IEEE Draft Revision for IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.4B: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) (Amendment of IEEE Std 802.15.4-2003)," in IEEE Std P802.15.4/D6, vol., no., pp., Enero (2007). [en línea], disponible en:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4040981&isnumber=4040980>

[33] Alaimo, S., (2013), Novel Haptic Cues for UAV Tele-Operation, Berlin, Alemania: MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT.

[34] Campaña, A., Escobar, G., (2014). Diseño e implementación de una aplicación móvil que cumpla la función de estación en tierra para el monitoreo de UAV's en el centro de investigación y desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (tesis de pregrado). Universidad de

las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Latacunga, Ecuador.

[35] Tabuchi, R., (2015). Diseño de un Vehículo Aéreo no Tripulado de cuatro rotores para una carga útil de 1 kg (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

[36] Llandres, B., “Los UAS, una valoración sobre su uso”, Diciembre (2015), [en línea], disponible en: [http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs\\_opinion/2015/DIEEEO134-2015\\_UAS\\_Valoracion\\_BorjaLlandres.pdf](http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_opinion/2015/DIEEEO134-2015_UAS_Valoracion_BorjaLlandres.pdf)

[37] Sánchez, G.; Mulero, M.; Saumeth, E., (2013), Vehículos aéreos no tripulados en Latinoamérica, [en línea], disponible en: [http://www.infodefensa.com/wp-content/uploads/Vehiculos\\_aereos\\_no\\_tripulados\\_en\\_Latam.pdf](http://www.infodefensa.com/wp-content/uploads/Vehiculos_aereos_no_tripulados_en_Latam.pdf)

[38] TEAL GROUP CORPORATION., “PRESS RELEASE: UAV Production Will Total \$93 Billion”, Agosto (2015), [en línea], disponible en: <http://www.tealgroup.com/index.php/teal-group-news-media/item/press-release-uav-production-will-total-93-billion>

[39] Arboleda, G.; Massuh, F., (2014). Análisis de factibilidad del uso de drones en las plantaciones bananeras de la provincia de El Oro (tesis de pregrado). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

[40] INNOVAGRI - Cultivar innovando, (2014). Detección y control de malas hierbas, INNOVAGRI, [en línea]. Disponible en: <http://www.innovagri.es/investigacion-desarrollo-inovacion/deteccion-y-control-de-malas-hierbas.html>

[41] Pajares, G., (2015). Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(4), 281-329.

[42] Martínez, R., Merino, L., Ollero, L., Fire Detection Using Autonomous Aerial Vehicles With Infrared And Visual Cameras, [en línea], disponible en: <https://www.upo.es/isa/lmercab/papers/IFACIRVISUALDef.pdf>

[43] Jose Polo, Gemma Hornero, Coen Duijneveld, Alberto García, Oscar Casas, Design of a low-cost Wireless Sensor Network with UAV mobile node for agricultural applications, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 119, Noviembre (2015), pp 19-32, [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.024>

- [44] Ali Sayyed 1, Gustavo Medeiros de Araújo 2, João Paulo Bodanese 1,3 and Leandro Buss Becker 1, \*Dual-Stack Single-Radio Communication Architecture for UAV Acting As a Mobile Node to Collect Data in WSNs <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/9/23376/htm>
- [45] E. Köppea\*, D. Augustinb, M. Bartholmaia, W. Dauma. Air-based Multi-Hop Sensor Network for the Localization of Persons. [https://www.researchgate.net/publication/272380453\\_Air-based\\_Multi-hop\\_Sensor\\_Network\\_for\\_the\\_Localization\\_of\\_Persons](https://www.researchgate.net/publication/272380453_Air-based_Multi-hop_Sensor_Network_for_the_Localization_of_Persons)
- [46] DJI. (2016). Características AGRASMG-1. DJI, [en línea]. Disponible en: <http://www.dji.com/product/mg-1>
- [47] Calvo, C.; Herranz, F.; Calvo, P., (2014), Sistemas no tripulados, Madrid, España: perfiles IDS.
- [48] Vélez, J., (2015). Diseño y simulación aerodinámica y estructural de un vehículo aéreo no tripulado (tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Latacunga, Ecuador.
- [49] DJI. (2015). The World Leader in Camera Drones/Quadcopters for Aerial Photography. DJI, [en línea]. Disponible en: <http://www.dji.com/product/inspire-1/spec>
- [50] DJI. (2015). The World Leader in Camera Drones/Quadcopters for Aerial Photography. DJI, [en línea]. Disponible en: <http://www.dji.com/product/inspire-1/download>.
- [51] Seeeduino-Stalker v3 (2015, October 29). seeed WIKI. [en línea]. Disponible en: [http://www.seeedstudio.com/wiki/Seeeduino-Stalker\\_v3](http://www.seeedstudio.com/wiki/Seeeduino-Stalker_v3)
- [52] Lui, T. (Sin fecha). Digital relative humidity & temperature sensor RHT03. Niwot, Colorado, United States.: MaxDetect Technology Co., LTD. [en línea]. Disponible en: <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/RHT03.pdf>
- [53] Hughes, T. (2012). RHT03\_HelloWorld. ARM mbed, [en línea]. Disponible en: <https://developer.mbed.org/cookbook/RHT03>
- [54] Seidle, N. (2013). Weather Shield. SparkFun Electronics. [en línea]. Disponible en: <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/Arduino/Shields/Weather%20Shield.pdf>

[55] Seidle, N. (2013). Weather Shield Hookup Guide. Colorado, United States: SparkFun Electronics, [en línea]. Disponible en: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/weather-shield-hookup-guide>

[56] Vinayak, J. (2014). ZigBee technology, [en línea]. Disponible en: <http://www.slideshare.net/vandjadhav/zigbee-technology-autosaved>

[57] ADH. Data Sheet/GP-635T. ADH Technology Co. Ltd. [en línea]. Disponible en: <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/GPS/GP-635T-121130.pdf>

[58] Ulyate, J. (2010). Reading an SD card with an ATMEGA168, [en línea]. Disponible en: <http://elasticsheep.com/2010/01/reading-an-sd-card-with-an-atmega168/>

[59] Mattio, H; Tilca, F. (2009, October). Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica, y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores. Argentina.: [en línea]. Disponible en: [http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/accion\\_viento/Recomendaciones\\_Mediciones\\_de\\_Viento.pdf](http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/accion_viento/Recomendaciones_Mediciones_de_Viento.pdf)

[60] Luque, S. (2015, November). Batería Li-Ion vs LiPo: Tipos de batería mellizos. España.: [en línea]. Disponible en: <http://www.androidpit.es/bateria-li-ion-vs-lipo-tipos-comparacion>.

[61] Morales, L., Quezada, V., Riofrío, L., (2013), Diseño y fabricación de un equipo portable para provisión de energía eléctrica basado en el aprovechamiento de energía solar, orientado a aplicaciones de camping (tesis de pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.

[62] Kooijman, M.; Rapp, A. (2015). Xbee – Arduino. GitHub, Inc, [en línea]. Disponible en: <https://github.com/andrewrapp/xbee-arduino/blob/master/XBee.h>

[63] DIGI International. (2012, March). XBee/XBee-PRO ZB RF Modules. Minnetonka, Minnesota, United States.: Digi International Inc. [en línea]. Disponible en: <https://www.adafruit.com/datasheets/XBee%20ZB%20User%20Manual.pdf>

[64] DIGI International. (Sin fecha). XBee - PRO 900. Minnetonka, Minnesota, United States.: Digi International Inc. [en línea]. Disponible en: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-900-Datasheet.pdf>

[65] DIGI International. (2008, March 8). XBee / XBee-PRO 900 Módulos RF OEM. Minnetonka, Minnesota, United States.: [en línea]. Disponible en: <https://fccid.io/document.php?id=924944>

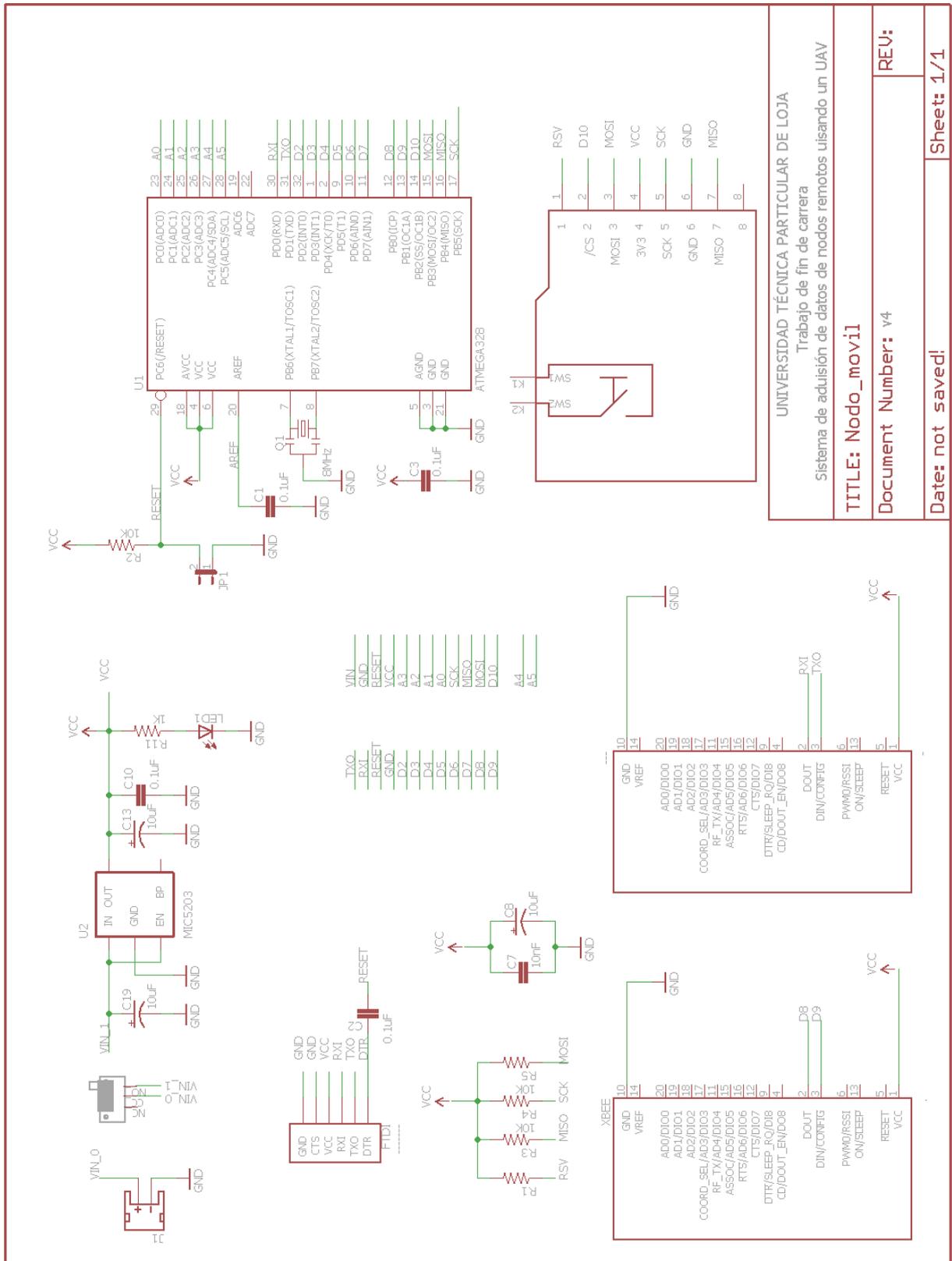
[66] Remko. (2016). Radio Móvil – software de simulación de la propagación de RF. Nederland. [en línea]. Disponible en: <http://radiomobile.pe1mew.nl/?Calculations>.

[67] Chapra, S., Canale, R., (2014), Métodos numéricos para ingenieros. 5ta Ed, México, D.F, México.: MC Graw Hill.

## **ANEXOS**

# ANEXO A: DISEÑO DEL MÓDULO A MONTARSE EN EL UAV

## A.1. Diagrama de conexiones.



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA  
Trabajo de fin de carrera  
Sistema de adquisición de datos de nodos remotos usando un UAV

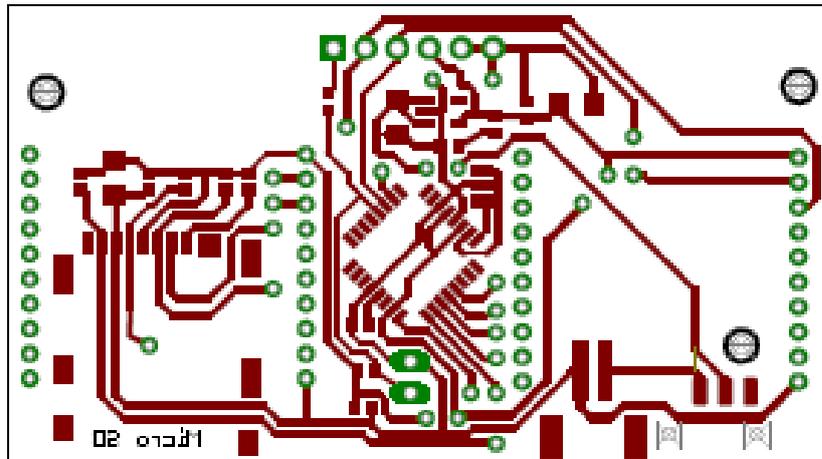
TITLE: **Nodo\_mov11**

Document Number: v4

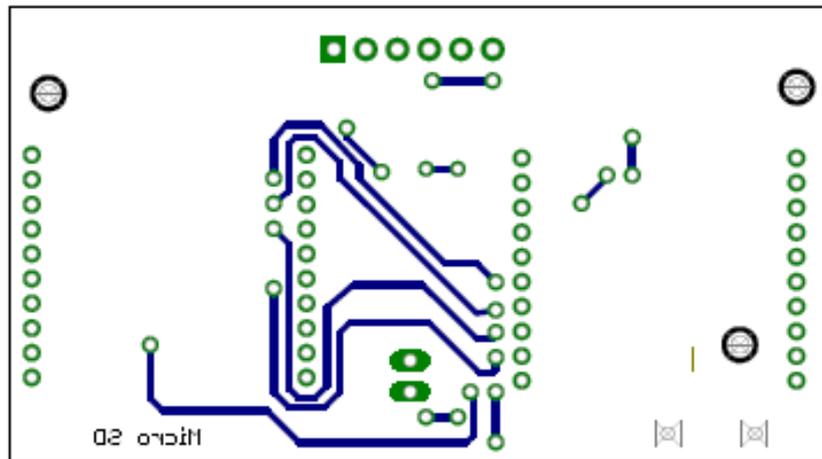
Date: not saved!

Sheet: 1/1

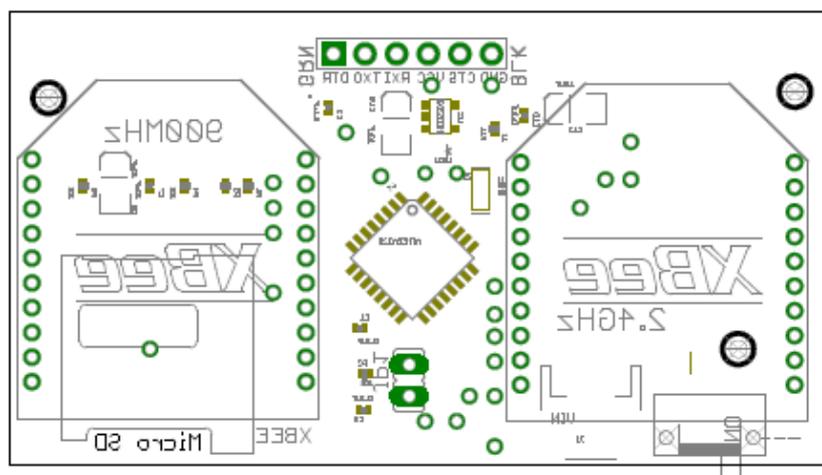
**A.2. Diseño de la tarjeta de circuito impreso. Parte superior.**



**A.3. Diseño de la tarjeta de circuito impreso. Parte inferior.**



**A.4. Diseño de la tarjeta de circuito impreso. Capa de serigrafía.**



#### A.5. Datasheet del dispositivo implementado.

Parámetro	Valor
MCU	ATmega328
Oscilador	8 MHz
Lógica de I/O	3.3V
Voltaje de alimentación	Batería LiPo a 3.7V
Voltaje de alimentación Máximo.	16V
Conector de energía.	JST a 2 pines
Conectividad	UART
Corriente en circuito abierto.	6mA
Corriente Máxima	300mA
Socket de RF	2 sockets tipo Bee.
Interface GPS	JST a 6 pines (UART-I <sup>2</sup> C) compatible con el módulo GPS635T
Dimensión del PCB	71.8mm x 36.7mm
IDE de la placa.	Arduino Pro or Pro Mini (3.3v, 8 MHz) w/ATmega328

## ANEXO B: TABLA DE COMANDO DE REFERENCIA

*XBee®/XBee-PRO® RF Modules - 802.15.4 - v1.xEx [2009.09.23]*

### Special

**Table 3-01. XBee-PRO Commands - Special**

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
WR	Special	<b>Write.</b> Write parameter values to non-volatile memory so that parameter modifications persist through subsequent power-up or reset. Note: Once WR is issued, no additional characters should be sent to the module until after the response "OK!" is received.	-	-
RE	Special	<b>Restore Defaults.</b> Restore module parameters to factory defaults.	-	-
FR (v1.x80*)	Special	<b>Software Reset.</b> Responds immediately with an OK then performs a hard reset ~100ms later.	-	-

\* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

### Networking & Security

**Table 3-02. XBee®/XBee-PRO® Commands - Networking & Security (Sub-categories designated within [brackets])**

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
CH	Networking (Addressing)	<b>Channel.</b> Set/Read the channel number used for transmitting and receiving data between RF modules (uses 802.15.4 protocol channel numbers).	0x0B - 0x1A (XBee) 0x0C - 0x17 (XBee-PRO)	0x0C (12d)
ID	Networking (Addressing)	<b>PAN ID.</b> Set/Read the PAN (Personal Area Network) ID. Use 0xFFFF to broadcast messages to all PANS.	0 - 0xFFFF	0x3332 (13106d)
DH	Networking (Addressing)	<b>Destination Address High.</b> Set/Read the upper 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DL, it defines the destination address used for transmission. To transmit using a 16-bit address, set DH parameter to zero and DL less than 0xFFFF. 0x0000000000000000 is the broadcast address for the PAN.	0 - 0xFFFFFFFF	0
DL	Networking (Addressing)	<b>Destination Address Low.</b> Set/Read the lower 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DH, DL defines the destination address used for transmission. To transmit using a 16-bit address, set DL parameter to zero and DL less than 0xFFFF. 0x0000000000000000 is the broadcast address for the PAN.	0 - 0xFFFFFFFF	0
MY	Networking (Addressing)	<b>16-bit Source Address.</b> Set/Read the RF module 16-bit source address. Set MY = 0xFFFF to disable reception of packets with 16-bit addresses. 64-bit source address (serial number) and broadcast address (0x0000000000000000) is always enabled.	0 - 0xFFFF	0
SH	Networking (Addressing)	<b>Serial Number High.</b> Read high 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	Factory-set
SL	Networking (Addressing)	<b>Serial Number Low.</b> Read low 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	Factory-set
RR (v1.xA0*)	Networking (Addressing)	<b>XBee Retries.</b> Set/Read the maximum number of retries the module will execute in addition to the 3 retries provided by the 802.15.4 MAC. For each XBee retry, the 802.15.4 MAC can execute up to 3 retries.	0 - 6	0
RN	Networking (Addressing)	<b>Random Delay Slots.</b> Set/Read the minimum value of the back-off exponent in the CSMA-CA algorithm that is used for collision avoidance. If RN = 0, collision avoidance is disabled during the first iteration of the algorithm (802.15.4 - macMinBE).	0 - 3 [exponent]	0
MM (v1.x80*)	Networking (Addressing)	<b>MAC Mode.</b> MAC Mode. Set/Read MAC Mode value. MAC Mode enables/disables the use of a Digi header in the 802.15.4 RF packet. When Modes 0 or 3 are enabled (MM=0,3), duplicate packet detection is enabled as well as certain AT commands. Please see the detailed MM description on page 47 for additional information.	0 - 3 0 = Digi Mode 1 = 802.15.4 (no ACKs) 2 = 802.15.4 (with ACKs) 3 = Digi Mode (no ACKs)	0
NI (v1.x80*)	Networking (Identification)	<b>Node Identifier.</b> Stores a string identifier. The register only accepts printable ASCII data. A string can not start with a space. Carriage return ends command. Command will automatically end when maximum bytes for the string have been entered. This string is returned as part of the ND (Node Discover) command. This identifier is also used with the DN (Destination Node) command.	20-character ASCII string	-
ND (v1.x80*)	Networking (Identification)	<b>Node Discover.</b> Discovers and reports all RF modules found. The following information is reported for each module discovered (the example cites use of Transparent operation (AT command format) - refer to the long ND command description regarding differences between Transparent and API operation). MY<CR> SH<CR> SL<CR> DB<CR> NI<CR><CR>  The amount of time the module allows for responses is determined by the NT parameter. In Transparent operation, command completion is designated by a <CR> (carriage return). ND also accepts a Node Identifier as a parameter. In this case, only a module matching the supplied identifier will respond. If ND self-response is enabled (NO=1) the module initiating the node discover will also output a response for itself.	optional 20-character NI value	
NT (v1.xA0*)	Networking (Identification)	<b>Node Discover Time.</b> Set/Read the amount of time a node will wait for responses from other nodes when using the ND (Node Discover) command.	0x01 - 0xFC [x 100 ms]	0x19

**Table 3-07. XBee®/XBee-PRO® Commands - Diagnostics**

AT Command	Command Category	Name and Description	Parameter Range	Default
HV (v1.x80*)	Diagnostics	<b>Hardware Version.</b> Read hardware version of the RF module.	0 - 0xFFFF [read-only]	Factory-set
DB	Diagnostics	<b>Received Signal Strength.</b> Read signal level [in dB] of last good packet received (RSSI). Absolute value is reported. (For example: 0x58 = -88 dBm) Reported value is accurate between -40 dBm and RX sensitivity.	0x17-0x5C (XBee) 0x24-0x64 (XBee-PRO) [read-only]	-
EC (v1.x80*)	Diagnostics	<b>CCA Failures.</b> Reset/Read count of CCA (Clear Channel Assessment) failures. This parameter value increments when the module does not transmit a packet because it detected energy above the CCA threshold level set with CA command. This count saturates at its maximum value. Set count to "0" to reset count.	0 - 0xFFFF	-
EA (v1.x80*)	Diagnostics	<b>ACK Failures.</b> Reset/Read count of acknowledgment failures. This parameter value increments when the module expires its transmission retries without receiving an ACK on a packet transmission. This count saturates at its maximum value. Set the parameter to "0" to reset count.	0 - 0xFFFF	-
ED (v1.x80*)	Diagnostics	<b>Energy Scan.</b> Send 'Energy Detect Scan'. ED parameter determines the length of scan on each channel. The maximal energy on each channel is returned and each value is followed by a carriage return. Values returned represent detected energy levels in units of -dBm. Actual scan time on each channel is measured as Time = [(2 ^ SD) * 15.36] ms. Total scan time is this time multiplied by the number of channels to be scanned.	0 - 6	-

\* Firmware version in which the command was first introduced (firmware versions are numbered in hexadecimal notation.)

## ANEXO C: DATASHEET DEL REGULADOR LINEAL DE VOLTAJE MIC5203-3.3BM4



### MIC5203

μCap™ 80mA Low-Dropout Voltage Regulator

#### General Description

The MIC5203 is a μCap™ 80mA linear voltage regulator with very low dropout voltage (typically 20mV at light loads and 300mV at 80mA) and very low ground current (225μA at 20mA output), offering better than 3% initial accuracy with a logic-compatible enable input.

The μCap™ regulator design is optimized to work with low-value, low-cost ceramic capacitors. The outputs typically require only 0.47μF of output capacitance for stability.

Designed especially for hand-held, battery-powered devices, the MIC5203 can be controlled by a CMOS or TTL compatible logic signal. When disabled, power consumption drops nearly to zero. If on-off control is not required, the enable pin may be tied to the input for 3-terminal operation. The ground current of the MIC5203 increases only slightly in dropout, further prolonging battery life. Key MIC5203 features include current limiting, overtemperature shutdown, and protection against reversed battery.

The MIC5203 is available in 2.8V, 3.0V, 3.3V, 3.6V, 3.8V, 4.0V, 4.5V, 4.75V, and 5.0V fixed voltages. Other voltages are available; contact Micrel for details.

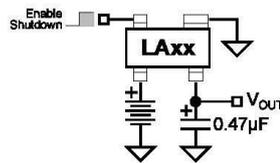
#### Features

- Tiny 4-lead and 5-lead surface-mount packages
- Wide Selection of output voltages
- Guaranteed 80mA output
- Low quiescent current
- Low dropout voltage
- Tight load and line regulation
- Low temperature coefficient
- Current and thermal limiting
- Reversed input polarity protection
- Zero off-mode current
- Logic-controlled shutdown
- Stability with low-ESR ceramic capacitors

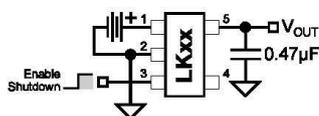
#### Applications

- Cellular telephones
- Laptop, notebook, and palmtop computers
- Battery-powered equipment
- Bar code scanners
- SMPS post-regulator/dc-to-dc modules
- High-efficiency linear power supplies

#### Typical Applications



SOT-143 Version



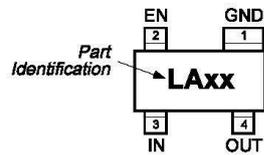
SOT-23-5 Version

#### Ordering Information

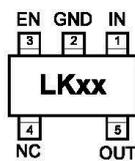
Part Number	Marking	Voltage	Junction Temp. Range	Package
MIC5203-3.0BM4	LA30	3.0V	-40°C to +125°C	SOT-143
MIC5203-3.3BM4	LA33	3.3V	-40°C to +125°C	SOT-143
MIC5203-3.6BM4	LA36	3.6V	-40°C to +125°C	SOT-143
MIC5203-3.8BM4	LA38	3.8V	-40°C to +125°C	SOT-143
MIC5203-4.0BM4	LA40	4.0V	-40°C to +125°C	SOT-143
MIC5203-4.5BM4	LA45	4.5V	-40°C to +125°C	SOT-143
MIC5203-4.7BM4	LA47	4.75V	-40°C to +125°C	SOT-143
MIC5203-5.0BM4	LA50	5.0V	-40°C to +125°C	SOT-143
MIC5203-2.8BM5	LA28	2.8V	-40°C to +125°C	SOT-23-5
MIC5203-3.0BM5	LK30	3.0V	-40°C to +125°C	SOT-23-5
MIC5203-3.3BM5	LK33	3.3V	-40°C to +125°C	SOT-23-5
MIC5203-3.6BM5	LK36	3.6V	-40°C to +125°C	SOT-23-5
MIC5203-3.8BM5	LK38	3.8V	-40°C to +125°C	SOT-23-5
MIC5203-4.0BM5	LK40	4.0V	-40°C to +125°C	SOT-23-5
MIC5203-4.5BM5	LK45	4.5V	-40°C to +125°C	SOT-23-5
MIC5203-4.7BM5	LK47	4.75V	-40°C to +125°C	SOT-23-5
MIC5203-5.0BM5	LK50	5.0V	-40°C to +125°C	SOT-23-5

Other voltages available. Contact Micrel for details.

## Pin Configuration



**SOT-143 (M4)**



**SOT-23-5 (M5)**

## Pin Description

Pin Number SOT-143	Pin Number SOT-23-5	Pin Name	Pin Function
1	2	GND	Ground
2	3	EN	Enable (Input): TTL/CMOS compatible control input. Logic high = enabled; logic low or open = shutdown.
3	1	IN	Supply Input
	4	NC	Not internally connected.
4	5	OUT	Regulator Output

### Absolute Maximum Ratings (Note 1)

Input Supply Voltage ( $V_{IN}$ )	–20V to +20V
Enable Input Voltage ( $V_{EN}$ )	–20V to +20V
Power Dissipation ( $P_D$ )	Internally Limited
Storage Temperature Range ( $T_S$ )	–60°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 5 sec.)	260°C

### Operating Ratings (Note 2)

Input Voltage ( $V_{IN}$ )	2.5V to 16V
Enable Input Voltage ( $V_{EN}$ )	0V to $V_{IN}$
Junction Temperature Range	–40°C to +125°C
Thermal Resistance ( $\theta_{JA}$ )	<b>Note 3</b>

**Electrical Characteristics**

$V_{IN} = V_{OUT} + 1V$ ;  $I_L = 1mA$ ;  $C_L = 0.47\mu F$ ;  $V_{EN} \geq 2.0V$ ;  $T_J = 25^\circ C$ , **bold values indicate**  $-40^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$ , unless noted.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
$V_O$	Output Voltage Accuracy		-3 -4		3 4	% %
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Temp. Coefficient	<b>Note 4</b>		<b>50</b>	<b>200</b>	ppm/ $^\circ C$
$\Delta V_O/V_O$	Line Regulation	$V_{IN} = V_{OUT} + 1V$ to 16V		0.008	0.3 <b>0.5</b>	% %
$\Delta V_O/V_O$	Load Regulation	$I_L = 0.1mA$ to 80mA, <b>Note 5</b>		0.08	0.3 <b>0.5</b>	% %
$V_{IN}-V_O$	Dropout Voltage, <b>Note 6</b>	$I_L = 100\mu A$		20		mV
		$I_L = 20mA$		200	<b>350</b>	mV
		$I_L = 50mA$		250		mV
		$I_L = 80mA$		300	<b>600</b>	mV
$I_Q$	Quiescent Current	$V_{EN} \leq 0.4V$ (shutdown)		0.01	10	$\mu A$
$I_{GND}$	Ground Pin Current, <b>Note 7</b>	$I_L = 100\mu A$ , $V_{EN} \geq 2.0V$ (active)		180		$\mu A$
		$I_L = 20mA$ , $V_{EN} \geq 2.0V$ (active)		225	<b>750</b>	$\mu A$
		$I_L = 50mA$ , $V_{EN} \geq 2.0V$ (active)		850		$\mu A$
		$I_L = 80mA$ , $V_{EN} \geq 2.0V$ (active)		1800	<b>3000</b>	$\mu A$
$I_{GNDDO}$	Ground Pin Current at Dropout	$V_{IN} = V_{OUT(nominal)} - 0.5V$ , <b>Note 7</b>		200	<b>300</b>	$\mu A$
$I_{LIMIT}$	Current Limit	$V_{OUT} = 0V$		180	<b>250</b>	mA
$\Delta V_O/\Delta P_D$	Thermal Regulation	<b>Note 8</b>		0.05		%/W
<b>Enable Input</b>						
$V_{IL}$	Enable Input Voltage Level	logic Low (off)			<b>0.6</b>	$\mu A$
$V_{IH}$		logic high (on)	<b>2.0</b>			$\mu A$
$I_{IL}$	Enable Input Current	$V_{IL} \leq 0.6V$		0.01	1	$\mu A$
$I_{IH}$		$V_{IH} \geq 2.0V$		15	<b>50</b>	$\mu A$

**Note 1:** Exceeding the absolute maximum rating may damage the device.

**Note 2:** The device is not guaranteed to function outside its operating rating.

**Note 3:** The maximum allowable power dissipation at any  $T_A$  (ambient temperature) is  $P_{D(max)} = (T_{J(max)} - T_A) / \theta_{JA}$ . Exceeding the maximum allowable power dissipation will result in excessive die temperature, and the regulator will go into thermal shutdown. The  $\theta_{JA}$  is 250 $^\circ C/W$  for the SOT-143 and 220 $^\circ C/W$  for the SOT-23-5 mounted on a printed circuit board.

**Note 4:** Output voltage temperature coefficient is defined as the worst case voltage change divided by the total temperature range.

**Note 5:** Regulation is measured at constant junction temperature using low duty cycle pulse testing. Parts are tested for load regulation in the load range from 0.1mA to 150mA. Changes in output voltage due to heating effects are covered by the thermal regulation specification.

**Note 6:** Dropout Voltage is defined as the input to output differential at which the output voltage drops 2% below its nominal value measured at 1V differential.

**Note 7:** Ground pin current is the regulator quiescent current plus pass transistor base current. The total current drawn from the supply is the sum of the load current plus the ground pin current.

**Note 8:** Thermal regulation is defined as the change in output voltage at a time "t" after a change in power dissipation is applied, excluding load or line regulation effects. Specifications are for a 150mA load pulse at  $V_{IN} = 16V$  for  $t = 10ms$ .