

**SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE VARIABLES AGRÍCOLAS
BASADO EN LA TECNOLOGÍA WSN PARA EL CULTIVO DE LA YUCA**

ING. JOSÉ GREGORIO CAICEDO ORTIZ



DEPARTAMENTO DE
CIENCIAS
DE LA COMPUTACIÓN
Y ELECTRÓNICA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

ENERO DEL 2017

**SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE VARIABLES AGRÍCOLAS
BASADO EN LA TECNOLOGÍA WSN PARA EL CULTIVO DE LA
YUCA.**

ING. JOSÉ GREGORIO CAICEDO ORTIZ

Trabajo de grado para obtener el título de Magíster en ingeniería

TUTOR: Ph.D. ALEJANDRO CAMA PINTO

CO-TUTOR: Ph.D (c). FARID MELÉNDEZ PERTUZ

UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y
ELECTRÓNICA**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

ENERO DEL 2017

Nota de aceptación:

Firma de jurado

Firma de jurado

Barranquilla, 10 de enero 2017

CONTENIDO

	Pág
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2. JUSTIFICACIÓN.....	10
3. OBJETIVOS.....	12
3.1 OBJETIVO GENERAL	12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
4. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL	13
4.1 FUNDAMENTOS RELACIONADOS CON EL CULTIVO DE LA YUCA 14	
4.1.1. Descripción morfológica de la yuca	15
4.1.2. Variedades de la yuca presentes en la Región Caribe Colombiana	16
4.1.3. Siembra y producción	17
4.1.4. Variables agronómicas influyentes en el desarrollo de la yuca	19
4.1.5. Ubicación geográfica para la evaluación del modelo de despliegue propuesto	21
4.2 LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	23
4.2.1. Limitantes en la agricultura de precisión	27
4.3 LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN DE VARIABLES AGRONÓMICAS	29
4.3.1. <i>GPS</i>	30
4.3.2. Data-Loggers	31
4.3.3. Wireless Sensor Network – WSN	33
4.3.4. Protocolos de comunicación	38
4.3.4.1. Protocolo 802.15.4	38
4.3.4.1.1. Dispositivos en una red con protocolo <i>IEEE 802.15.4</i>	40
4.3.4.2. Protocolo <i>6LoWPAN</i>	41
4.3.4.2.1. Pila del Protocolo <i>6LoWPAN</i>	42
4.3.4.2.2. Tipos de direcciones IPv6	44
4.3.4.2.3. Cabecera del protocolo <i>IPv6</i>	44
4.3.4.3. Protocolo <i>CoAP</i>	46
4.3.4.4. Protocolo RPL	48
4.3.5. Internet de las Cosas - IOT	55
4.3.6. Sistemas operativos para plataformas de hardware en WSN	57
4.3.6.1. Contiki	58
4.3.6.2. TinyOS	59
4.3.7. Mecanismos de enrutamiento en las WSN.....	61
4.3.8. Motas utilizadas en WSN	63
4.3.8.1. Mota <i>MICA2</i>	64
4.3.8.2. Mota <i>TELOSB</i>	66
4.3.8.3. Mota <i>Eko outdoor wireless system</i>	67

4.3.8.4.	Mota Libelium Waspote.....	69
4.3.9.	Técnicas para el análisis estadístico de los datos.....	73
4.3.9.1.	Test de Kolmogorov-Smirnov o K-S.....	74
4.3.9.2.	Test de Kruskal-Wallis	76
4.3.10.	Métricas para evaluar el rendimiento de la red	78
5.	LAS WSN EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	83
6.	MATERIALES	88
6.1	LA MOTA ZI	88
6.2	SENSORES.....	93
6.2.1.	Sensor SHT11	94
6.2.2.	Sensor TMP102	95
6.3	SERVIDORES EMBEBIDOS PARA WSN	96
6.3.1.	Sheevaplug.....	96
6.3.2.	Raspberry Pi	97
6.4	ARQUITECTURAS CLIENTE SERVIDOR	100
6.4.1.	LAMP	100
6.4.2.	XAMPP.....	104
7.	METODOLOGÍA.....	106
7.1	CONSIDERACIONES INICIALES DE DISEÑO	106
7.2	PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DEL MODELO DE DESPLIEGUE DE UNA WSN PARA EL CULTIVO DE YUCA	109
7.3	PRUEBAS DE CAMPO	114
7.3.1.	Prueba entre dos nodos a 10 metros con línea de vista (Indoor).....	114
7.3.2.	Prueba entre dos nodos a 10 metros con obstáculos.....	117
7.3.3.	Prueba entre dos (2) nodos a 50 metros con línea de vista	121
7.3.4.	Prueba entre dos (2) nodos a 100 metros con línea de vista	124
7.3.5.	Prueba de convergencia de la red.....	129
7.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS	131
7.4.1.	Análisis de los porcentajes de paquetes perdidos.....	131
7.4.2.	Análisis de los datos de RSSI	132
7.4.3.	Análisis de los datos de LQI.....	133
7.4.4.	Análisis de los datos de Convergencia	135
7.4.5.	Cálculo de cobertura entre equipos y modelo de despliegue de la red	136
7.5	PRESUPUESTO DE ENLACE	139
7.6	DATOS OBTENIDOS EN CULTIVO DE YUCA.....	148
7.7	ALMACENAMIENTO Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS.....	149
	CONCLUSIONES.....	155

TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

	Pág
Tabla 4-1 Variedades de yuca más utilizadas en la región Caribe Colombiana.....	17
Tabla 4-2 Variables agronómicas influyentes en el desarrollo de la yuca.	20
Tabla 4-3 Ventajas y desventajas de la tecnología GPS.....	31
Tabla 4-4 Ventajas y desventajas de la tecnología Data-Loggers.....	33
Tabla 4-5 Ventajas y desventajas de las WSN.	37
Tabla 4-6 Resumen de las funciones de la Capa Física y Sub Capa MAC.	39
Tabla 4-7 Características de las bandas de frecuencia del protocolo IEEE 802.15.4.....	41
Tabla 4-8 Conceptos relacionados con el protocolo RPL.	49
Tabla 4-9 Aspectos a considerar para la elección del Sistema Operativo.	60
Tabla 4-10 Diferencias entre enrutamiento estático y dinámico.	62
Tabla 4-11 Características principales de la mota Mica2.....	65
Tabla 4-12 Características de la mota TelosB.	67
Tabla 4-13 Características de la mota TelosB.....	72
Tabla 6-1 Consumo energético aproximado de la mota Z1 para MSP430f2617.	91
Tabla 6-2 Consumo energético aproximado del CC2420.	91
Tabla 6-3 Consumo energético aproximado del acelerómetro ADXL345.....	91
Tabla 6-4 Consumo energético aproximado de la memoria flash externa M25P16.	91
Tabla 6-5 Consumo energético aproximado del sensor de temperatura TMP102.	91
Tabla 6-6 Valores nominales máximos absolutos del módulo WSN Z1.....	92
Tabla 6-7 Características del sensor SHT11.	94
Tabla 6-8 Características del sensor TMP102.....	95
Tabla 6-9 Características entre modelos de la Raspberry PI.....	98
Tabla 6-10 Elementos que conforman a LAMP.....	101
Tabla 6-11 Elementos de una arquitectura LAMP.....	101
Tabla 6-12 Elementos que conforman a XAMPP.....	104
Tabla 6-13 Comparación LAMP y XAMPP.....	104
Tabla 7-1 Niveles de potencia permitidos para la mota Z1.....	109
Tabla 7-2 Prueba de 10 m entre nodos con línea de vista.	115
Tabla 7-3 RSSI - LQI 10 m entre nodos con línea de vista.....	116
Tabla 7-4 Prueba con 10 m entre nodos con obstáculos.....	118
Tabla 7-5 RSSI - LQI en prueba a 10 m con obstáculos.....	119
Tabla 7-6 Prueba con 50 m entre nodos con línea de vista.	122
Tabla 7-7 RSSI - LQI en prueba a 50 m con línea de vista.....	123
Tabla 7-8 Prueba a 100 m con línea de vista.....	125
Tabla 7-9 RSSI - LQI en prueba a 100 m con línea de vista.....	126
Tabla 7-10 Prueba de convergencia a 50 metros con un salto entre Gateway (13AC) y nodo (139F).	130
Tabla 7-11 Prueba de convergencia a 50 metros dos saltos entre Gateway (13AC), el nodo 1 (139F) y el nodo 2 (13BB).	130
Tabla 7-12 Datos suministrados por el test K-S para paquetes perdidos.	131
Tabla 7-13 Datos suministrados por el test K-S para RSSI.....	133

Tabla 7-14 Datos suministrados por el test K-S para LQI.	134
Tabla 7-15 Datos suministrados por el test K-S para Convergencia.	135
Tabla 7-16 Datos de cada presupuesto de enlace.	142
Tabla 7-17 Valores obtenidos en prueba de campo.	149

FIGURAS

Figura 4-1 Distribución de área sembrada con yuca por regiones 2000 - 2009.	15
Figura 4-2 Distribución de la producción de yuca fresca por regiones 2000-2009.	15
Figura 4-3 Componentes del sistema radical de la yuca.	16
Figura 4-4 Componentes del sistema radical de la yuca.	16
Figura 4-5 Departamento del Atlántico.	22
Figura 4-6 Etapas de la agricultura de precisión.	26
Figura 4-7 Estadios de adopción de las TICs por parte de los agricultores.	27
Figura 4-8 Sistema GPS.	30
Figura 4-9 Data-Loggers - MSR.	33
Figura 4-10 Data-Loggers - Decagon Devices.	33
Figura 4-11 Topología Single-hop star.	35
Figura 4-12 Topología en malla con multisaltos, (multi-hop mesh).	36
Figura 4-13 Topología en cuadrícula con multisaltos (multi-hop grid).	36
Figura 4-14 Topología Clúster jerárquico de dos niveles (Two-tier hierarchical cluster). .	36
Figura 4-15 Ejemplos de nodos sensores, de izquierda a derecha TelosB Empresa Memsic , Z1 empresa Zolertia y Wasp mote empresa Libelium.	37
Figura 4-16 Capa de medios del modelo OSI.	39
Figura 4-17 Topologías en estrella y par a par.	41
Figura 4-18 Modelo red 6LoWPAN con Edge Router.	42
Figura 4-19 Pila del protocolo 6LoWPAN.	43
Figura 4-20 Cabecera del protocolo IPv6.	45
Figura 4-21 Capa y diseño del protocolo CoAP.	47
Figura 4-22 Red RPL DAG con múltiples DODAG.	50
Figura 4-23 Red RPL DAG con múltiples DODAG.	50
Figura 4-24 Estructura multipunto-punto red RPL, envío del DIO por parte del nodo RPL DODAG.	52
Figura 4-25 Estructura multipunto-punto red RPL, envío del DIO por parte del nodo RPL DODAG.	52
Figura 4-26 Rangos definidos y selección de rutas por cada nodo.	52
Figura 4-27 Envío de mensaje DAO desde los nodos 4-3-2 al RPL DODAG (nodo 1) para establecer la ruta de envío.	53
Figura 4-28 Internet de las cosas.	56
Figura 4-29 Relación población mundial respecto dispositivos conectados a internet.	56
Figura 4-30 Mota MICA2.	65
Figura 4-31 Mota TELOSB.	66
Figura 4-32 Mota eKo.	68
Figura 4-33 Mota Libelium de Wasp mote.	69
Figura 4-34 Distribución de componentes placa Wasp mote.	71
Figura 4-35 Distribución de componentes II placa Wasp mote.	71

Figura 4-36 Placa integradora de sensores para agricultura.	71
Figura 6-1 Mota Z1 de Zolertia.	89
Figura 6-2 Dimensiones de la Mota Z1.	89
Figura 6-3 Diagrama de bloques de la mota Z1.	90
Figura 6-4 Mota Z1 distribución de componentes.	92
Figura 6-5 Sensor SHT11.	94
Figura 6-6 Sensor SHT11 con cubierta metálica contra el óxido.	94
Figura 6-7 Dispositivo Sheevaplug.	96
Figura 6-8 Dispositivo Sheevaplug cerrado.	97
Figura 6-9 Raspberry PI 3 Model B.	99
Figura 6-10 Proceso de una petición en LAMP.	102
Figura 7-1 Distribución de nodos en las capas para la teselación cuadrículada.	112
Figura 7-2 Vista aérea del terreno planteado para el despliegue.	112
Figura 7-3 Plantilla para el cálculo de cobertura entre sensores.	113
Figura 7-4 Diagrama de un enlace con línea de vista entre 2 nodos.	115
Figura 7-5 Diagrama de enlace entre dos (2) nodos con obstáculos.	118
Figura 7-6 Despliegue para prueba de convergencia, con distancia de 50 m entre cada nodo.	130
Figura 7-7 Paquetes perdidos en pruebas de campo de radio enlace.	131
Figura 7-8 RSSI en pruebas de campo de radio enlace.	132
Figura 7-9 LQI en pruebas de campo de radio enlace.	134
Figura 7-10 Convergencia en pruebas de campo de radio enlace.	135
Figura 7-11 Aplicación de plantilla para calcular el r_{sense} en una hectárea.	137
Figura 7-12 Modelo de despliegue de la red en terreno de Manatí Atlántico.	139
Figura 7-13 Configuración de enlaces en Radio Mobile (Parameters).	143
Figura 7-14 Configuración de enlace en Radio Mobile (Systems).	144
Figura 7-15 Evaluación del enlace entre NOGateway y N24C2.	145
Figura 7-16 Configuración de Radio Mobile adicionando 10% de pérdidas por vegetación.	146
Figura 7-17 Evaluación del enlace con el 10% de pérdidas por vegetación.	146
Figura 7-18 Equipos en campo con cultivo de yuca.	148
Figura 7-19 Interfaz de acceso SIMCA.	150
Figura 7-20 Visualización de las gráficas en SIMCA (I).	151
Figura 7-21 Visualización de las gráficas en SIMCA (II).	151
Figura 7-22 Visualización de los datos en tiempo real.	152
Figura 7-23 Información de los datos capturados por mota.	153
Figura 7-24 Datos descargados de SIMCA.	154

RESUMEN

La agricultura y en general los recursos naturales asociados al desarrollo de esta, como el agua, suelos y los bosques, cumplen un rol importante en el futuro de los países y la conservación del medio ambiente, por consiguiente se ha procurado la optimización de éstos recursos mediante la implementación de estrategias y herramientas tecnológicas que así lo posibiliten, tal como lo plantea (Perfetti, Balcázar, Hernández, & Leibovich, 2013). Se analizaron diferentes plataformas de hardware, protocolos de comunicación y sistemas operativos para motas, enfocados a las *WSN* (*Wireless Sensor Network*). Luego, se desarrolló un prototipo de monitorización de variables agrícolas para el cultivo de yuca en el Departamento del Atlántico, basado en la plataforma *Z1* de la empresa *Zolertia*, programada a través del lenguaje *Contiki* y funcionando con el protocolo *RPL* (*Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks* - Protocolo de enrutamiento para redes de bajo consumo y pérdidas). La integración de las motas, el sistema operativo y el protocolo se evaluaron con métricas de rendimiento de pérdida de paquetes, *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator* - Indicador de Fuerza de la Señal Recibida), *LQI* (*Link Quality Indicator* - Indicador de la Calidad de la Señal) y convergencia de la red, mostrando un buen funcionamiento a diferentes distancias. Posteriormente se realizó un modelo de despliegue basado en polígonos regulares, haciendo uso de las ecuaciones de *Schläfli* (la cantidad de nodos se pudo calcular evitando la aleatoriedad). Adicionalmente se calculó el rango de cobertura para los nodos obteniendo la distancia que deben tener entre sí para mantener la uniformidad en la red según lo sugerido en (Poe & Schmitt, 2009). Se realizaron presupuestos de enlaces de la red con las distancias calculadas y las características de los equipos, evaluados a través del *software Radio Mobile*, para finalmente plantear un modelo de despliegue.

Palabras claves: yuca, agricultura de precisión, redes inalámbricas de sensores, *WSN*, *RPL*, *Z1*, *Zolertia*, modelo de despliegue.

ABSTRACT

Agriculture and natural resources associated to it, like water, soil and forest carry out an important role in country's future and environment conservation, thus, the optimization of these resources through implementation strategies and technological gadgets make this possible (Perfetti, Balcázar, Hernández, & Leibovich, 2013). Different platforms, communication protocols and operative systems for motes were analyzed, focused on WSN (Wireless Sensor Network). Then, an agricultural monitoring prototype for yucca farming in Atlantico department was developed, based on Z1 Zolertia platform, programmed by Contiki language and working with RPL protocol (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks). The motes integration, the operative system and protocol, were evaluated with packet losses performance metrics, RSSI (Received Signal Strength Indicator), LQI (Link Quality Indicator) and network convergence, showing a good performance at different distances. Later, a deployment model was made based on regular polygons, using the Schäfli (the number of nodes can be calculated avoiding randomness). Additionally, the node coverage range was calculated, obtaining the distance between them to keep the network uniformity as suggested in (Poe & Scmitt, 2009). Link Networks Budgets were made with the calculated distances and device specifications, using Radio Mobile software, to finally plant a deployment model.

Keywords: Cassava, precision agriculture, wireless sensor networks, WSN, RPL, Z1, Zolertia, model of deployment.

INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión surge como una mezcla entre las prácticas agrícolas y las tecnologías de la información, buscando a través de la tecnificación del campo, brindar a los agricultores las herramientas necesarias que les permitan mantener un control, monitoreo y trazabilidad de sus cultivos y las variables que influyen en el correcto desarrollo de los mismos (Orozco & Llano Ramírez, 2016). Colombia se caracteriza por ser un país con una diversidad climática en sus diferentes regiones, esto ha permitido que la agricultura colombiana sea variada, lo cual ha contribuido al crecimiento económico del país ya que es una de las principales fuentes de empleos, contribuyendo con la producción de productos de consumo para la canasta familiar y permitiendo la exportación de los mismos. Los principales productos que el sector agrícola colombiano produce, son la caña de azúcar, el café, el arroz, el mango y la yuca, entre otros. Este último es considerado como el noveno producto de alimentación básica a nivel mundial, complementariamente es importante resaltar, que algunos tipos de la familia de este tubérculo no son utilizados para el consumo humano, pero si en la industria para el desarrollo de otros productos, tal como lo indica (Aguilera Díaz, 2012). Colombia se encuentra posicionado como el tercer país productor de este tubérculo en Latinoamérica, y en particular, la Costa Atlántica es una de las regiones con mayor producción de yuca (Gutierrez, 2009).

La agricultura de precisión forma parte de las aplicaciones que implementan *WSN* por las características que presentan, como: fácil despliegue en terrenos bastante amplios, bajo coste en relación a implementaciones que hacen uso de redes cableadas, autonomía energética durante largos períodos de tiempo, además de los beneficios que ofrece en

cuanto a la adaptabilidad que brindan para la monitorización de diferentes cultivos; aparte de brindar al agricultor información en tiempo real sobre el cultivo facilitando la toma de decisiones para la aplicación de los insumos necesarios en su mantenimiento, lo que se traduce en ahorro, tal como lo manifiesta (Urbano-molano & Aparicio, 2012).

En coherencia con lo anterior, en el presente trabajo se analizaron varias plataformas de hardware para WSN como la mota *eKo*, *Libelium*, *Mica* y la *Z1* de la empresa *Zolertia*. Esta última mostró mayor flexibilidad de manejo y compatibilidad con el sistema operativo *Contiki* y diferentes protocolos de comunicación como *6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks)* que significa *IPv6* sobre redes de área personal inalámbrica de baja potencia), *CoAP (The Constrained Application Protocol)*, que significa Protocolo de Aplicación Restringida) y *RPL*. Se escogió el protocolo *RPL* para el proceso de implementación requerido en esta investigación, debido a las ventajas que ofrece, respecto a otras tecnologías. Se destaca de él: que es adaptable a sistemas con baja capacidad de procesamiento y consumo energético, que la recolección de datos no se detiene, aunque un nodo falle y que los datos no se distorsionan durante el proceso transmisión entre los nodos de la red.

Se analizaron diferentes métricas de rendimiento para evaluar la tecnología y protocolo escogido, éstas fueron: la pérdida de paquetes entre emisor y receptor, el *RSSI* y el *LQI*. Las pruebas aplicadas fueron a distancia entre emisor y receptor de 10, 50, 100 mts con línea de vista y una prueba final de 10 mts con obstáculos, para determinar su estabilidad comunicacional. También se evaluó la convergencia de la red con uno y dos saltos entre nodo y *Gateway*, los datos obtenidos fueron evaluados estadísticamente utilizando *Matlab®*, con un procedimiento de bondad de ajuste que mide el grado de

concordancia existente entre los datos obtenidos en las pruebas de campo (valores observados) y una distribución teórica específica (valores esperados).

Por último, con la ayuda del software *Radio Mobile* se evaluaron los presupuestos de enlaces previamente calculados, y se analizó su comportamiento en la topografía del terreno, perteneciente a una finca del Municipio de Manatí, en el Sur del Departamento del Atlántico. Donde se planteó el modelo de despliegue de la red, como herramienta de apoyo a los agricultores, para la toma de decisiones que ayuden a mejorar la calidad de los cultivos, con el consecuente aumento de la competitividad del sector agrícola del Departamento, tomando como base la agricultura de precisión.

La investigación se encuentra estructurada de la siguiente forma, en primer lugar un estudio del marco conceptual donde se analizan los tres (3) ejes temáticos (fundamentos relacionados con el cultivo de yuca, la agricultura de precisión y las tecnologías principales utilizadas en sistemas de monitorización de variables agronómicas) que fundamentan la propuesta planteada; seguido se presenta un breve análisis del estado del arte sobre aplicaciones similares a las planteadas en esta investigación. Un capítulo de materiales donde se define el hardware, sistema operativo y protocolo de comunicación para *WSN*, seguido de la metodología implementada para el desarrollo de las pruebas de campo. Posteriormente se realiza el análisis de los resultados estadísticos, continuando con el diseño del modelo de despliegue. Se calcularon los presupuestos de enlace los cuales son analizados a través del software *Radio Mobile*. Luego el almacenamiento y visualización de los datos se realiza a través de una interfaz *web*, para finalmente presentar las conclusiones.

Capítulo No 1. Planteamiento del Problema

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Departamento del Atlántico en su zona sur, cuenta con una economía agropecuaria conformada principalmente por cultivos de yuca, mango, maíz, guayaba, hortalizas, frijoles y plátanos en el subsector agrícola, y producción de carne, queso y leche en el subsector pecuario (Beradinelli, 2015), representando el 2,3% del PIB (Producto Interno Bruto) del departamento; la cual es considerada poco significativa teniendo en cuenta que la agricultura colombiana ha contribuido al total del PIB con porcentajes que oscilan entre el 10% y 14% desde el año 1994, satisfaciendo parte de la demanda alimentaria de la nación y proveyendo los insumos necesarios para la diversidad de industrias productoras de alimentos, que generan aproximadamente el 21% del empleo del país (Perfetti et al., 2013) y (Eduardo Verano de la Rosa, 2016).

Por otra parte, con la intención de mitigar los daños que sufren los cultivos a causa de los cambios climáticos, los agricultores hacen uso inadecuado y desmedido de fertilizantes químicos causantes de gases de efecto invernadero, degradación de los suelos, bosques y otros ecosistemas afectando también la calidad de los cultivos y por ende la economía de los productores, debido a que no cuentan con un sistema que les indique las características medioambientales a las que estos se exponen, temperatura real, humedad del aire, humedad del suelo y hoja, entre otros parámetros. Con esta información en tiempo real, se puede elegir el momento adecuado para aplicar fertilizantes, plaguicidas y agua para los cultivos de acuerdo al estado del tiempo, las condiciones físico-químicas del suelo y los microclimas; logrando que el riego de estos productos se realice en sectores específicos del cultivo y no de manera general, evitando el gasto de insumos y generando

Capítulo No 1. Planteamiento del Problema

un ahorro de recursos, esto con un correcto seguimiento permitirían minimizar el tiempo, dinero y calidad de los cultivos maximizando de esta forma los resultados del sector agrícola (Beradinelli, 2015).

Pese a que los TLCs firmados entre Colombia y otros países son una importante oportunidad para grandes empresas Colombianas (como la textil y algunas empresas manufactureras) mejoren sus tasas de exportación, también representa graves consecuencias desfavorables, para sectores menos competitivos como el agropecuario, provocando el cierre de pequeñas y medianas empresas, si el gobierno no brinda el apoyo necesario para que estos sectores mejoren su competitividad ante los mercados internacionales (Contreras, 2013).

Actualmente gracias al avance tecnológico se han desarrollado herramientas y tecnologías (*GPS (Global Positioning System)* y *DataLoggers*) para la monitorización de los cultivos. Los GPS son utilizados como guía para vehículos autónomos que atienden cultivos, y para el mapeo del campo, entre otras aplicaciones, según (Yang & Lee, 2013). Los *Data-Loggers* brindan robustez y precisión en la toma de datos (Lozoya, Aguilar, & Mendoza, 2016). Pese a que estas tecnologías se han implementado con éxito en aplicaciones de agricultura de precisión como se ilustra en (Han, Kang, Park, & Jang, 2007) y (Weidong, Chun, & Jing, 2010), es importante precisar que estas tecnologías tienden a ser muy costosas, no estando al alcance de muchos agricultores. Por otra parte, la tecnología *GPS* es dependiente de la cobertura suministrada por los operadores locales de telefonía, con una baja o incluso nula recepción de la señal en algunas zonas del país, presentan problemas de exactitud en la captación de los datos, debido a factores climáticos, el costo de su implementación también presenta la desventaja de la su baja autonomía en relación al

Capítulo No 1. Planteamiento del Problema

consumo energético. Por otra parte, los *Data-Loggers* ofrecen poca escalabilidad al no integrarse con otros dispositivos, conectividad baja al no brindar información de los protocolos de comunicación utilizados y falta de flexibilidad, entre otros aspectos.

Siguiendo este orden de ideas, la identificación y validación de tecnologías adecuadas para el monitoreo de los cultivos de yuca, representa un reto si se tiene en cuenta que actualmente existen muchas plataformas de hardware para la agricultura de precisión, capaces de operar con diferentes protocolos de comunicación y dispositivos sensores variados. Por tal motivo es indispensable una buen análisis de los componentes que integran un sistema de monitoreo, partiendo de la premisa que cada aplicación es un caso único de estudio.

Es en este punto donde las WSN, conformadas por dispositivos autónomos capaces de procesar y transmitir información de manera remota y de forma inalámbrica (Buratti, Conti, Dardari, & Verdone, 2009); se perfilan como una solución bastante flexible, ya que a pesar de tener bajo procesamiento de cómputo respecto a otras tecnologías, facilitan la implementación y control de los protocolos de comunicación a través de los diferentes sistemas operativos para redes inalámbricas desarrollados en los últimos años, como son *TinyOS* y *Contiki*. Además brindan un mayor control y flexibilidad sobre las configuraciones y parámetros a manipular en las diferentes plataformas de hardware existentes en el mercado, que otorguen estas características. Respecto a la implementación brindan comodidad al momento de distribuir los equipos ya sea siguiendo un patrón determinado o de forma aleatoria en un área específica, llegando incluso a abarcar grandes extensiones de tierra y logrando operar de manera desatendida durante mucho tiempo gracias a su bajo consumo energético. Las WSN son una solución robusta con bajo coste de

Capítulo No 1. Planteamiento del Problema

implementación en comparación con otras tecnologías (R. Fernández, J. Ordieres, F. Martínez, A. González, F. Alba, R. Lostado, 2009). En la agricultura de precisión se encuentran aplicaciones de las WSN para el control de riego o la monitorización de variables atmosféricas como se evidencia en (Aqeel-ur-Rehman, Abbasi, Islam, & Shaikh, 2014).

Después de lo anteriormente expuesto, resulta oportuno aclarar que estas redes también presentan características que se deben estudiar con más detalle de acuerdo a la aplicación específica. Como, evaluar cuál plataforma de hardware cuenta con mejor capacidad de procesamiento de cómputo, transmisión y recepción de señales, integración con diferentes protocolos, qué protocolo brinda las mejores prestaciones de comunicación y la tasa de consumo energético. El correcto análisis de todas estas variables, evidentemente proporcionará un mejor desempeño en el ambiente donde se implementará la red. Por consiguiente, es importante validar el comportamiento de una WSN cuyas propiedades fueron previamente escogidas para una aplicación específica, en este caso la monitorización de cultivos de yuca, antes de proponer un modelo final, garantizando el correcto funcionamiento de la misma al momento de realizar el despliegue piloto. En este orden de ideas se formula la siguiente pregunta. **¿Son las WSN una eficaz herramienta tecnológica de monitorización para los cultivos de yuca del Departamento del Atlántico?.**

Capítulo No 2. Justificación**2. JUSTIFICACIÓN**

La agricultura de precisión nace de la necesidad de brindar un tratamiento diferente a cada zona del campo, consiguiendo mejores resultados de medición y control, si los estudios se apoyan en la tecnología *WSN*, brindando datos en tiempo real de las condiciones propias del terreno y las variables agronómicas que lo afectan (Castro C., Chamorro F., & Viteri M., 2016). El mayor positivo impacto social, que puede aportar la agricultura de precisión, si es aplicada en los principales cultivos del país, sería conseguir ahorros importantes en la economía y una notable reducción del uso de fertilizantes químicos, evidenciable en la disminución de la cantidad de agua utilizada para el proceso de riego, con el fin de contribuir a la preservación del medio ambiente.

Con la agricultura de precisión se suministra a los agricultores información sobre las variables agronómicas que influyen en el desarrollo de sus cultivos (Cedeño, Zambrano, & Medina, 2014), así, es posible labrar, fertilizar, regar o sembrar de manera más eficiente el campo, tratando de conseguir la máxima producción posible dentro de un área limitada. Esto incide en la reducción de costos de producción y aumenta la preservación del medio ambiente, debido a la disminución en el uso del agua y fertilizantes, que en algunos casos contaminan (Fertilizantes químicos). De igual forma, la monitorización en los cultivos contribuye a mejorar su calidad porque los agricultores obtienen herramientas que facilitan la toma de decisión con mayor grado de objetividad y certeza, en función de los parámetros que inciden en sus cultivos.

Gracias a los desarrollos y avances tecnológicos que experimentan los sistemas embebidos para redes de sensores inalámbricas, estos contribuyen como fuente de

Capítulo No 2. Justificación

información en tiempo real para diferentes áreas de investigación, captando la atención de científicos e investigadores (Cama, De la Hoz, & Cama, 2012). Dentro de las oportunidades que ofrecen llama la atención la capacidad de proporcionar información actualizada y con alto nivel de precisión. Por ello, los sistemas agrícolas basados en *WSN* se caracterizan por realizar tareas de seguimiento, evaluación y control, indispensables para obtener mayores beneficios en un campo de cultivo (Cedeño et al., 2014).

Con la implementación de tecnologías basadas en *WSN* se logra un aporte significativo en el incremento de la eficiencia, optimización y uso de los recursos, reduciendo costes y pérdidas, generando un incremento en la competitividad global de las empresas a nivel nacional e internacional, permitiendo generar históricos de datos de las variables medidas para un posterior análisis ya sea por parte del mismo agricultor, la comunidad investigativa o entidades interesadas en el estudio de este tubérculo como Clayuca, Finagro (Fondo para el financiamiento del sector agropecuario), *CIAT* (*International Center for Tropical Agriculture* en español Centro Internacional de Agricultura Internacional), entre otras.

Capítulo No 3. Objetivos

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de monitorización de variables agrícolas soportado en la tecnología WSN para el cultivo de la yuca en el departamento del Atlántico con el propósito de mejorar la calidad de la cosecha.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los sistemas de monitoreo aplicados a cultivos agrícolas.
- Documentar las variables agronómicas a capturar, y las fases relativas al cultivo de la yuca.
- Evaluar y seleccionar los sensores más apropiados para el sistema de monitorización de las variables agronómicas del cultivo de yuca, de acuerdo a las particularidades del departamento del Atlántico y basándose en la tecnología WSN.
- Diseñar un sistema de monitorización de variables agrícolas aplicado al cultivo de la yuca e implementar prueba piloto del sistema de monitoreo propuesto.

4. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

Se han identificado tres ejes temáticos que es necesario documentar para fundamentar la presente investigación, que se refieren a los aspectos relacionados con el cultivo de la yuca, la agricultura de precisión y las principales tecnologías utilizadas en sistemas de monitorización de variables agronómicas. En cuanto al cultivo de la yuca ha sido necesario analizar su importancia en Colombia y en particular en la Costa Atlántica, de igual forma se efectuó una detallada descripción de la yuca y las variables agronómicas que influyen en su desarrollo. Dada su incidencia económica en los procesos productivos agrícolas nacional, regional y local, ha sido necesario documentar una de las estrategias que marcan tendencia en la actualidad, para promover la producción de productos agrícolas, apoyados con la tecnología, es decir, la agricultura de precisión, abordando aspectos tales como las etapas, ventajas, barreras, limitantes y objetivos. Complementariamente se documentaron una serie de fundamentos relacionados con las principales tecnologías utilizadas en sistemas de monitorización de variables agronómicas, tales como: los sistemas de posicionamiento global (*GPS*), los *Data-Loggers* y las *WSN*, resaltando las ventajas y desventajas de cada una de estas tecnologías. Se analizaron tanto los protocolos de comunicación más utilizados en las redes *WSN* (*802.15.4*, *6LoWPAN*, *CoAP* y *RPL*), como los sistemas operativos propios de plataformas de hardware en *WSN* (*Contiki* y *TinyOS*). Por último, se hizo una descripción de algunos tipos de motas utilizadas en *WSN* (*MICA2*, *TELOSB*, *eko outdoor wireless system* y *Libelium Waspote*), los mecanismos de enrutamiento y las herramientas para el análisis estadístico de los datos (*Test de Kolmogorov-Smirnov* y *Test de Kruskal-Wallis*) en el contexto de las *WSN* y el Internet de

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

las cosas *IoT*.

4.1 FUNDAMENTOS RELACIONADOS CON EL CULTIVO DE LA YUCA

Este tubérculo está considerado un insumo importante en la seguridad alimentaria de países en vía de desarrollo, y Colombia es el tercer país de Latinoamérica tanto en área sembrada como en producción anual de yuca, con 185.000 hectáreas y 2.1 millones de toneladas, después de Brasil con 1.944.834 de hectáreas sembradas y una producción 27 millones de toneladas; seguido de Paraguay con 320.000 hectáreas sembradas y aproximadamente 5 millones de toneladas de producción (Gutierrez, 2009).

En Colombia la yuca se cultiva en diferentes ubicaciones geográficas gracias a la variedad de clima que presenta el país. De éstas es importante resaltar a la zona de la Costa Atlántica colombiana, como uno de los zonas principales de cultivo de yuca con aproximadamente un 50% de la producción nacional, debido a que este producto es preferido por pequeños agricultores gracias al buen desarrollo que presenta en condiciones marginales de clima y suelo ver figuras 4-1 y 4-2. Además la yuca es considerada como el noveno producto de alimentación básica más importante a nivel mundial después del arroz, trigo, caña de azúcar, maíz, soya, papa, las legumbres y el aceite de palma, jugando un papel importante en la dieta de millones de personas; conformando de esta forma, un suministro nutricional de energía ampliamente usado en la alimentación humana. Algunos de los productos que se desarrollan a partir de la yuca son: carimañolas, croquetas, harina de yuca, almidón, alimentos congelados. El almidón también es utilizado en los sectores industriales para la creación de pegantes, revestimientos de pastillas, en la industria textil para el engomado de telas de algodón entre otros. Aunque es notable la diversidad de productos derivados de la yuca, en Colombia se presentan problemas en la agroindustria

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

debido a que la variabilidad de los tiempos lluviosos provoca déficit en la producción de este tubérculo, y los que se almacenan durante mucho tiempo pierdan su valor o terminan dañándose (Aguilera Díaz, 2012).

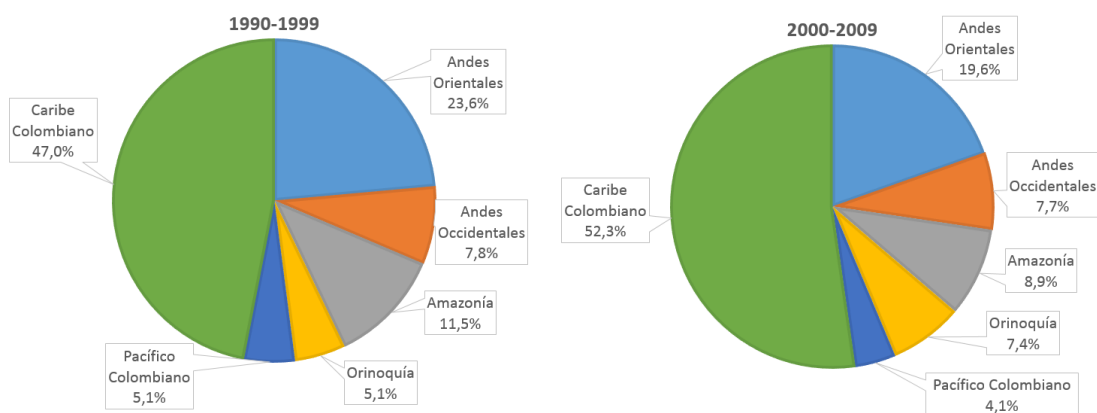


Figura 4-1 Distribución de área sembrada con yuca por regiones 2000 - 2009.

Fuente: (Aguilera Díaz, 2012)

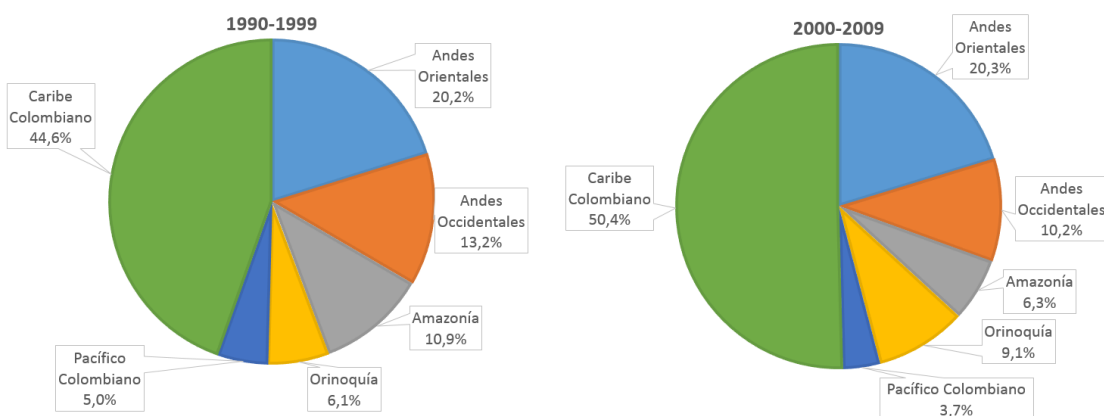


Figura 4-2 Distribución de la producción de yuca fresca por regiones 2000-2009.

Fuente: (Aguilera Díaz, 2012)

4.1.1. Descripción morfológica de la yuca

La yuca o *Manihot esculenta Crantz*, como se conoce por su nombre científico, es una planta de tipo leñosa la cual posee un tallo cilíndrico cuyo diámetro se encuentra entre los 2 y 6 cm, con una altura que oscila entre 1 y 3 metros, formados por nudos y entrenudos, cuyas hojas florecen a partir del tercero y cuarto mes y se caracterizan por ser gruesas, rígidas y ensiformes según

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

(Ceballos, 2002) y (Aguilera Díaz, 2012). La raíz de esta planta es cilíndrica con diámetros aproximado de 10 cm y longitudes capaces de alcanzar el metro de largo, a su vez posee una cáscara dura y leñosa la cual se extirpa del tubérculo para que pueda ser comestible (Cock, 1989). Ver figuras 4-3 y 4-4.

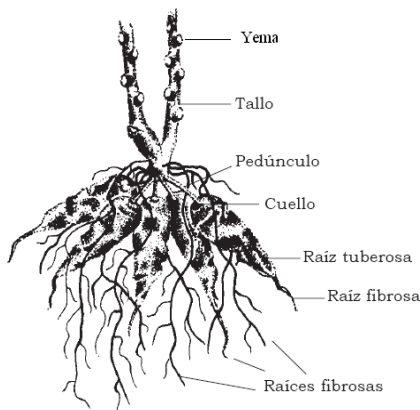


Figura 4-3 Componentes del sistema radical de la yuca.



Figura 4-4 Componentes del sistema radical de la yuca.

Fuente: (Aguilera Díaz, 2012)

4.1.2. Variedades de la yuca presentes en la Región Caribe Colombiana

De acuerdo a (Aguilera Díaz, 2012) las variedades de yuca más difundidas en la región Caribe son, la venezolana, caracterizada por su alto contenido de materia seca y almidón, la MTA18 y la “Verónica”, ambas con elevado potencial para el sector industrial. Esto se evidencia en la tabla 4-1, donde se resumen otras variedades de la yuca de la región y sus características más relevantes.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Tabla 4-1 Variedades de yuca más utilizadas en la región Caribe Colombiana.

<i>VARIEDAD</i>	<i>Rendimiento promedio raíces (ton/ha)</i>	<i>Materia seca (%) promedio</i>	<i>Rendimiento promedio materia seca (ton/ha)</i>	<i>Contenido cianogénico</i>	<i>Tipo de uso de la raíz</i>
Venezolana				Bajo	Doble propósito
ICA costeña (CG1141-1)	20,5-23,0	33,6	6,0	Intermedio	Doble propósito
ICA negrita (CM3306-4)	25,0				Doble propósito
Corpoica-Colombiana (CM 3306-19)	21,4-24,8	33,0	7,0	Intermedio	Industrial
Corpoica-Rojita	23,0-25,8	33,0	8,6	Intermedio	Industrial
Corpoica-Sucreña				Intermedio	Industrial
M TAI 8	34,2*	33,1	11,3	Alto	Industrial
Verónica (CM 4919-1)	21,3-27,0*	34,0	7,2	Alto	Industrial
Gines (CM 4843-1)	20,4-23,0*	34,0	6,9	Alto	Industrial
Verdecita (M COL 1505)	19,5-22,0	34,0	6,6	Intermedio	Industrial
* Producción experimental en ensayos de rendimiento, pruebas regionales y parcelas de preproducción.					
Fuente: Tabla preparada por Fernando Calle, tomada de la base de datos sobre mejoramiento de la yuca.					

Fuente: (Aguilera Díaz, 2012)

4.1.3. Siembra y producción

Según (Aristizábal & Sánchez, 2007) y (Aguilera Díaz, 2012), normalmente se practican dos tipos de siembra, la manual y la mecanizada.

La **siembra manual o tradicional**, es muy común en el gremio de los pequeños agricultores y consiste en enterrar de forma vertical estacas entre 5 y 10 cm, de los 20 cm que suelen medir. Se trata de dejar la mayor cantidad de nudos o yemas enterradas, y la labor de sembrado es realizada en promedio por una cantidad que va de 6 a 8 trabajadores por hectárea/día.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

La **siembra mecanizada**, es muy común entre los grandes productores. En este caso la profundidad de siembra está en un rango de los 5 y 8 cm y es realizada a través de maquinaria manipulada por dos operarios (alimentadores) y uno que conduce la máquina, alcanzando a sembrar entre 5 y 7 hectáreas/día.

(Aguilera Díaz, 2012) y (Aristizábal & Sánchez, 2007), indican que las distancias sugeridas para la siembra, entre dos plantas es de 80x80cm o 100x100 cm, para generar entre 15.625 y 10.000 siembras por hectárea. El ciclo de producción de la planta está comprendido por el periodo de un año; a partir del tercer mes las raíces incrementan su peso y el autoconsumo por parte de los campesinos se inicia desde los 6 u 8 meses.

Cuando se va a realizar la siembra de este cultivo lo primero que se lleva a cabo es la preparación del suelo, proceso que normalmente se inicia durante las temporadas de sequías a profundidades de 25 o 45 cm intentando facilitar el crecimiento del tubérculo. Cabe resaltar que esta planta tolera suelos con bajo índice de fertilidad, escasos en fósforo o con exceso de aluminio característica de los suelos ácidos, sin embargo, los suelos inundados no son tolerados.

Por consiguiente (Aguilera Díaz, 2012) caracterizó los suelos en los que la planta se desarrolla de manera óptima considerando que esta posee tres características principales: (1) las estomas de la planta se cierran con el aire seco, (2) las raíces extraen el agua a profundidades de 2,5 m aproximadamente y (3) aún con poca agua éstas logran fijar el carbono.

Por tanto, se adaptan y crecen en:

- Trópicos subhúmedos, caracterizados por presentar precipitaciones de 800 a 1500 mm por año, ejemplo de esto es la Costa Caribe Colombiana.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

- Sabanas de suelos ácidos, presentan de 1500 a 3000 mm por año con periodos de sequía cortos, por ejemplo, los Llanos Colombianos.
- Tierras bajas del trópico húmedo, se caracterizan por presentar precipitaciones superiores a los 3000 mm por año con un periodo de sequía no definido, esto es propio de la región amazónica colombiana.
- Trópico de altitud media, tienen altitudes de 800 a 1400 msnm.
- Trópicos de grandes altitudes, tienen altitudes de 1400 a 2000 msnm.
- Subtrópico, presentan altitudes superiores a las del trópico.
- Trópico semiárido, presenta una precipitación unimodal de menos de 800 mm por año. Esto se evidencia en regiones como la nordeste de Colombia.

Los factores contribuyen a identificar la calidad de la estaca o semilla de yuca son: (1) madurez y grosor del tallo, (2) número de nudos entre 5 y 6 por estacas y (3) tamaño de la estaca, entre 15 y 30 cm con longitud promedio de 20 cm.

De igual forma se debe evitar el crecimiento de maleza por la influencia negativa en el rendimiento del cultivo afectándolo en un 50% aproximadamente.

4.1.4. Variables agronómicas influyentes en el desarrollo de la yuca

Las características en común de los suelos propicios para el cultivo de la yuca, deben estar comprendidas en altitudes iguales o menores a los 1.800 msnm. Además, existen diferentes variables agronómicas influyentes en el desarrollo de la yuca como son, temperatura ambiente, luminosidad, fotoperiodo, humedad del aire, humedad y *pH* del suelo. La temperatura se debe mantener entre 20 y 30 °C siendo 24 °C la temperatura óptima, aunque también se ha detectado que puede desarrollarse a temperaturas

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

comprendidas entre los 16 y 38 °C deteniendo su crecimiento ante rangos inferiores a los 16 °C, por tal motivo este cultivo es óptimo para climas tropicales-húmedos, mientras que en regiones subtropicales el crecimiento se detiene, esto se evidencia en el área foliar de la planta por un desarrollo más lento y hojas más pequeñas. El rango de las precipitaciones está comprendido entre 800 y 3000 mm siendo 1.500 mm el valor óptimo, mientras que la humedad relativa está comprendida entre los 50 y 90% donde 72% está identificada como óptima según (Aristizábal & Sánchez, 2007).

En cuanto a la luminosidad y fotoperiodo, este cultivo crece y florece en condiciones plenas de luz con periodos de 10 – 12 horas propio de las regiones tropicales. Respecto al pH del suelo debe ser ligeramente ácido entre 6 y 7 y poseer características porosas, suelto y que no sean desérticos y no deben tener exceso de agua (Montaldo & Gunz, 1985) y (Infoagro, 2017).

Tabla 4-2 Variables agronómicas influyentes en el desarrollo de la yuca.

Temperatura	Humedad relativa	Fotoperiodo	pH del suelo	Humedad del suelo
25 - 29 °C máximo rendimiento con suficiente humedad. 16 – 38 °C desarrollo normal. Menor a 16 °C el crecimiento se detiene.	50% - 90% con una óptima de 70%	10 - 12 Horas	6 y 7 (ligeramente ácidos)	No admite encharcamientos

Fuente: (Infoagro, 2017)

El sistema planteado en esta investigación monitorizará dos variables: temperatura y humedad del suelo, esta última no tiene definidos parámetros óptimos como indicadores medibles, solamente se conoce que el suelo no debe estar encharcado, por lo tanto, surge la oportunidad de realizar mediciones a dicha variable y establecer rangos a través de la toma

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

continua de datos. No obstante, el sistema desarrollado en este trabajo es modular, es decir que, ante la necesidad de contar con más sensores, estos pueden ser agregados después de ser configurado el software para recoger su medición.

4.1.5. Ubicación geográfica para la evaluación del modelo de despliegue propuesto

Como terreno de evaluación para realizar el modelo de despliegue de esta red, se ha escogido el Municipio de Manatí ubicado en la parte sur occidental del departamento del Atlántico en Colombia, con las coordenadas latitud $10^{\circ}27'N$ y longitud $74^{\circ}58'0$. Limita al Norte con el municipio de Sabanalarga, al Sur con el municipio de Santa lucia y el Canal del Dique, que lo separan del municipio de San Cristóbal en el Departamento de Bolívar, al oriente con el municipio de Campo la Cruz y Candelaria y al Occidente con el embalse del Guájaro (Manati-atlantico.gov.co, 2017) y (Atlantico.gov.co, 2017b). Ver figura 4-5.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual



Figura 4-5 Departamento del Atlántico.
Fuente: (Atlantico.gov.co, 2017a)

Este Municipio representa el 6.30% del Departamento del Atlántico con una extensión de 206 km², de los cuales el 1,8% Km² corresponde al área urbana y el 98.2 Km² corresponden al área rural con una altura sobre el nivel del mar de 8 m. Es parcialmente plano, los suelos son arcillosos, permeables con un buen drenaje de textura moderadamente grueso, algunos presentan sales y sodio.

El Canal del Dique es la principal fuente hidrográfica, con agua proveniente del río Magdalena que abastecen al embalse del Guájaro y a su vez utiliza los canales artificiales en la distribución del agua necesaria para la agricultura y ganadería de la región. Por otra

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

parte, el clima tiende a ser lluvioso desde mayo a octubre mientras que el resto de mese se caracterizan por su sequedad. Los promedios de las temperaturas se mantienen en un rango de 27°C la mínima a 34°C la máxima, con valores de humedad relativa que oscilan entre los 70% y 90%.

Cabe resaltar que Manatí figura de acuerdo con (Atlantico.gov.co, 2017b), como un municipio con fuerte vocación agrícola al igual que Piojó, Luruaco, Repelón, Sabanalarga y Ponedera, en cuanto a distribución espacial de cultivos, donde destacan por el área en uso y la poca o ninguna técnica de explotación el maíz, yuca, sorgo, melón, ahuyama, ajonjolí, millo, guandú, ciruela, papaya, hortalizas, ñame y plátano conocidos como cultivos tradicionales.

4.2 LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Antes de la tecnificación en el campo, las tomas de decisiones de los agricultores se basaban en los cambios sufridos en los cultivos apoyándose en la observación y conocimientos previos, esto facilitaba la implementación de correctivos necesarios, pero no óptimos para el mantenimiento del cultivo llevándose a cabo sin una frecuencia establecida para ello. Gracias al creciente mercado de consumo moderno, es menester incrementar el tamaño de los cultivos para poder satisfacer la necesidad alimenticia, es en este punto donde se le dificulta al agricultor mantener un control sobre la cosecha, viéndose reflejado en un mal uso de los insumos como fertilizantes, agua, semilla, plaguicidas, entre otros, generando un incremento en los gastos de inversión, manutención y en ocasiones suscitando una baja calidad en sus cosechas afectando directamente su economía y sintiendo la necesidad de contar con sistemas tecnológicos que apoyen su labor diaria(N.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Zhang, Wang, & Wang, 2002), (Bongiovanni Rodolfo, Chartuni-Mantovani Evandro, Best Stanley, & Roel Álvaro, 2006).

La evolución de las Tecnologías de la información (TI) ha cambiado el entorno del desarrollo agrícola en muchos países, acelerando la transformación de la agricultura tradicional a la agricultura moderna, trayendo consigo la necesidad de investigar y estudiar las nuevas tecnologías y sus posibles aplicaciones en la agricultura para su posterior implementación en los países en desarrollo planteando el reto a Ingenieros, Agrónomos e incluso Economistas de integrar enfoques multidisciplinarios que brinden soluciones a problemas complejos en el crecimiento de la agricultura moderna o como se conoce hoy día Agricultura de Precisión (Maohua, 2001).

De acuerdo a (Gil, 2010), "La agricultura de precisión es la técnica de efectuar la intervención correcta, en el momento adecuado y en el lugar preciso". Son prácticas de la agricultura de precisión el uso de la maquinaria automatizada, modificación en el riego del cultivo, variación en la dosificación del uso de fertilizantes, el ajuste de las dosis de semillas de acuerdo al suelo, entre otras, que vienen desarrollando los agricultores de manera empírica gracias a un conocimiento previo de las condiciones de sus cultivos y a una metodología de ensayo y error (Jiber, Harroud, & Karmouch, 2011). Desde los inicios de la agricultura continúan desarrollándose nuevos métodos de tratamiento en atención a sus cultivos teniendo como beneficios principales, el incremento y la mejora de estos, disminuyendo los gastos en insumos y materia prima (Leiva, 2003). En ese sentido, las nuevas tecnologías como *GPS*, *SIG* (Sistema de Información Geográfica), el desarrollo de ordenadores miniaturizados, la teledetección, la informática móvil, el procesamiento avanzado de la información, las telecomunicaciones, los *Data-Loggers* y las *WSN* (*Wireless*

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Sensor Network) (Yang & Lee, 2013), han tenido una inmersión positiva en el sector agrícola, mejorando y facilitando la captación de las variabilidades agronómicas como humedad del suelo, conductividad eléctrica del suelo, temperatura del suelo y radiación fotosintéticamente activa, entre otras, presentes al interior de los cultivos y que muchas veces pasan desapercibidas por los agricultores (N. Zhang et al., 2002).

Por lo tanto, la combinación de los conocimientos obtenidos por los agricultores a través de sus experiencias, y la aplicación de la tecnología, permiten aprovechar de manera eficiente las materias primas e insumos a nivel del terreno para lograr un incremento en la cantidad y calidad del cultivo.

Consecuentemente, se puede ahondar en el concepto de agricultura de precisión como el conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas en función de la variabilidad espacial y temporal del cultivo (Pinto, Queiroz, Chartuni, & Ruz, 2007). Entiéndase **variabilidad espacial** como las diferencias de producción en un mismo campo, en una misma cosecha y una misma campaña. Por otra parte, la **variabilidad temporal** se refiere a los cambios de producción en un mismo campo y en distintas campañas de cosecha (Srinivasan, 2006) y (Pinto et al., 2007). Las prácticas agrícolas tradicionales están siendo apoyadas por la información suministrada de sistemas tecnológicos que en conjunto con la experiencia propia de cada agricultor contribuyen a la toma de decisiones de manera más objetiva.

Según (U.S. Department of Agriculture, 1998), (Leiva, 2003), (Srinivasan, 2006) y (Gil, 2010) la agricultura de precisión consta de tres etapas de desarrollo: monitoreo, análisis y ejecución. Las cuales se condensan en la figura 4-6 y se describen a continuación.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

El **monitoreo o recolección de datos** tiene como objetivo principal, obtener información de variables físicas, químicas o climáticas que sean consideradas de mayor incidencia en el óptimo desarrollo de cada cultivo. El uso de tecnologías *GPS*, *Data-Loggers* y *WSN* es común encontrarlas como herramientas principales de monitoreo debido a las características que presentan cada una de estas tecnologías, que serán analizadas posteriormente con mayor detalle.

En el **análisis, procesamiento e interpretación de los datos** se utilizan programas informáticos especializados para el tratamiento de los datos, mostrando la incidencia de las variables, respecto al comportamiento en el cultivo y que a simple vista no se percibe sino solo analizando grandes cantidades de datos.

Durante la **ejecución o aplicación de insumos** se aplican los correctivos necesarios al cultivo, ya sea de manera automatizada o manual. Tomando como base los resultados suministrados por el software y previamente validados por el agricultor.

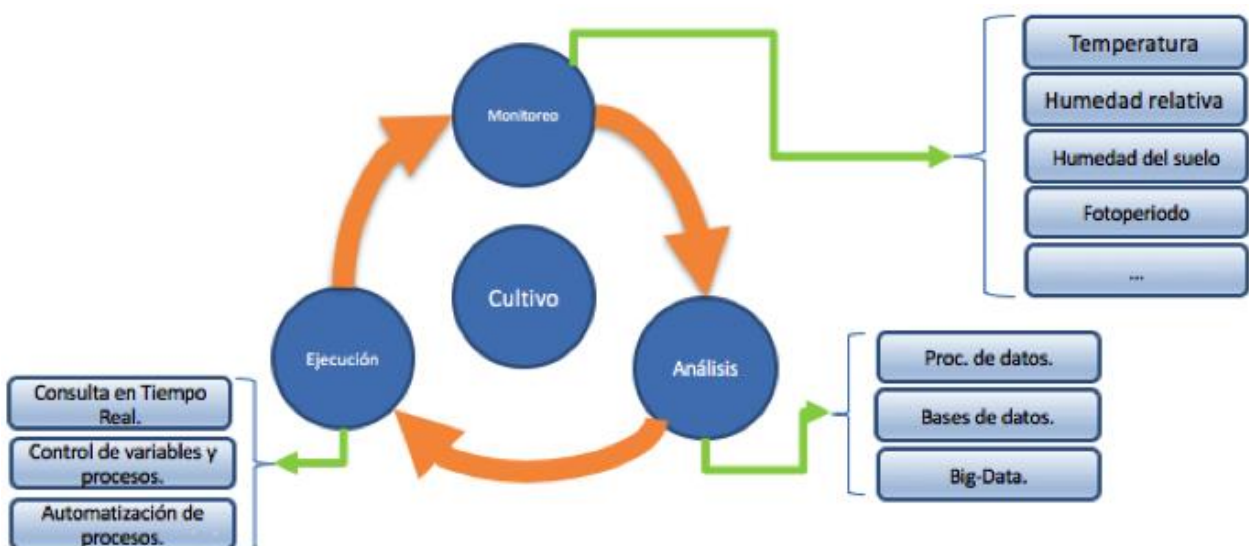


Figura 4-6 Etapas de la agricultura de precisión.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Fuente:(Caicedo – Ortiz, J).

4.2.1. Limitantes en la agricultura de precisión

Se ha limitado a grandes escalas de producción, debido a que se percibe como alto el coste de los equipos y herramientas usados para su implementación, sin analizar las ventajas competitivas que ofrecen. Además no es muy común el uso de computadoras por parte de pequeños y medianos agricultores, por ende no cuentan con las habilidades para manipular las herramientas TICs y presentan resistencia a pagar por esta formación (Nagel, 2012).

La figura 4-7, ilustra los procesos de adopción de las TICs por los agricultores, y se evidencia el crecimiento del uso de la información y el conocimiento (Nagel, 2012).

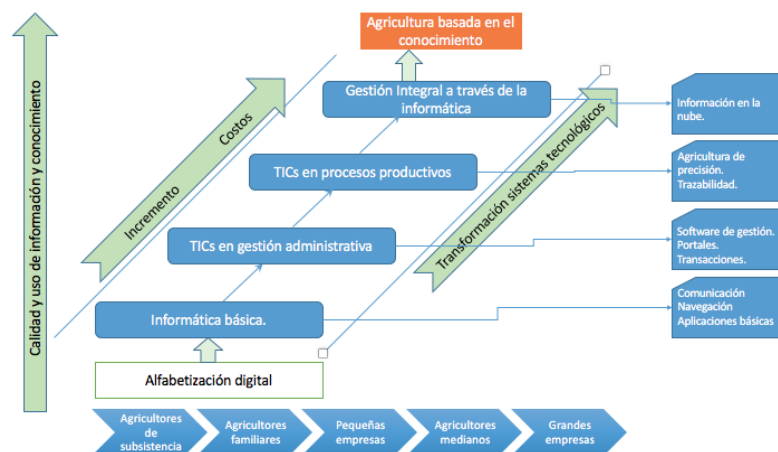


Figura 4-7 Estadios de adopción de las TICs por parte de los agricultores.

Fuente: (Nagel, 2012)

La agricultura de precisión según (Maohua, 2001), tiene los siguientes objetivos:

- Una correcta comprensión de la variabilidad del suelo.
- El rendimiento de los cultivos dentro del campo.
- La identificación de las causas que influyen en la variabilidad del rendimiento del cultivo.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

- Implementación de sistemas de gestión de operaciones en lugares específicos del cultivo.
- Incrementar la cantidad y calidad de los cultivos.
- Acumulación de la información concerniente al cultivo, para su posterior análisis y toma de decisiones.
- Evaluación de la eficacia del tratamiento.
- Minimizar el uso de insumos.
- Aprovechar la materia prima.
- Disminuir la contaminación del medio ambiente a través del uso eficiente de fertilizantes y plaguicidas.

A partir de lo anterior, se deduce que la agricultura de precisión es una alternativa para mejorar el desarrollo agrícola, gracias al aporte que brindan las modernas TIC y los sistemas de gestión para la toma de decisiones. Estos sistemas dependen en gran medida de la etapa de recolección de datos, donde se obtiene la mayor información y a las condiciones climáticas, físicas y químicas a las que se encuentra sometido el cultivo para su posterior análisis. A continuación se presenta un análisis de la etapa de monitorización y de las tecnologías más comunes que forman parte de ella, haciendo énfasis en *GPS*, *Data-Loggers* y *WSN*, que han tenido aceptación por el uso de sensores remotos que facilita la toma de decisiones (Leiva, 2003).

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual**4.3 LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN DE VARIABLES AGRONÓMICAS**

De acuerdo a (Magette, 2000) un sistema de monitoreo, es aquel que se encarga de recolectar información deseada del entorno en el que se encuentre, con un nivel de esfuerzo y costo aceptables, logrado a través de una correcta planificación, cuidadosa ejecución y una continua revisión y evaluación del proceso, atendiendo las necesidades de los usuarios.

El correcto diseño de un sistema de monitoreo se describe a partir de darle respuesta a los siguientes interrogantes:

- ¿Cómo, cuándo, y dónde se hace la captura de datos?
- ¿Cómo se realiza su análisis?
- ¿Cómo se almacenan los datos obtenidos, los resultantes y los analizados e interpretados?
- ¿Cómo se informará a los agricultores de los resultados?

Esto parte de una planificación con metas y objetivos, en equilibrio con los recursos económicos que se cuenta. Un ejemplo puntual es la captura de datos medioambientales y/o agronómicos de los cultivos de yuca que generen información útil. Ahora para ser más específico se agrega, el ¿cómo y para qué se hace obtienen los datos?

La agricultura se apoya en diferentes tecnologías modernas para realizar captura de datos (insumo necesario del análisis de cultivos). A finales de 1980, se tuvo como base de partida el *GPS*, integrado con sensores de suelo utilizados para medir la variabilidad espacial, los atributos del suelo, el rendimiento de los cultivos y las plagas en los mismos,

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

gracias a que se pueden obtener imágenes de alta resolución que permitan una visión de todo el cultivo en general (Yang & Lee, 2013).

4.3.1. GPS

Nace de la implementación del sistema *NAVSTAR-GPS* (*Navigation System Timing And Ranging - Global Positioning System*). Consta de 24 satélites posicionados en 6 órbitas diferentes, al menos 4 con órbita accesible desde cualquier parte del mundo (ver figura 4-8) y por cualquier persona, ya que el usuario no necesita pagar servicios especiales para obtener información de los mismos, solo debe contar con un sistema *GPS* receptor o incluso un *Smartphone*. Ambos con capacidad de utilizar las señales satelitales, calculando velocidad, tiempo y posición del usuario con aproximaciones bastante buenas, sin la necesidad de pagos extras de licencia. La precisión de los dispositivos receptores varía de acuerdo a la calidad de los mismos (5 a 20 metros en condiciones de línea de vista óptima) según (Casar-Corredera, 2005). Sin embargo, esto aumenta el coste (Huerta, Mangiaterra, & Noguera, 2005) y (Ibrahim, 2010).

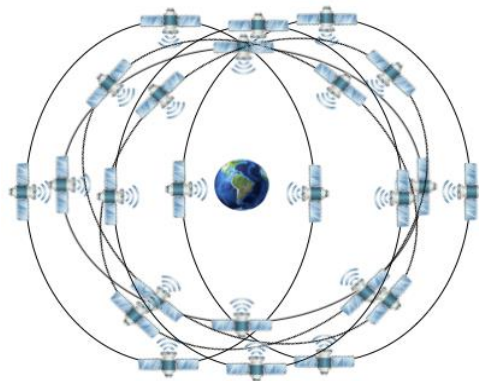


Figura 4-8 Sistema GPS.
Fuente: (Caicedo – Ortiz, J).

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

De acuerdo con (Huerta et al., 2005), “GPS es un sistema que determina las coordenadas espaciales de puntos, respecto de un sistema de referencia mundial. Los puntos pueden estar ubicados en cualquier lugar del planeta, pueden permanecer estáticos o en movimiento y las observaciones pueden realizarse en cualquier momento del día”.

De las múltiples aplicaciones en la que se puede implementar *GPS*, la agricultura de precisión ha adoptado esta tecnología por la facilidad que ofrece en relación a la georreferenciación. Entregando información de forma, dimensión y ubicación de cualquier punto u objeto, sobre la superficie terrestre, vinculando información espacial obtenida de diferentes fuentes, dando paso al desarrollo de los sistemas de información territoriales o geográficos (Huerta et al., 2005).

Tabla 4-3 Ventajas y desventajas de la tecnología GPS.

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Facilitan el seguimiento de objetos, materiales y personas. En la agricultura de precisión se puede utilizar como sistema guía para vehículos autónomos implementados para atender el cultivo (Yang & Lee, 2013).	Los dispositivos con mejores prestaciones de esta tecnología tienden a ser muy costosos, los económicos pueden representar baja calidad a largo plazo.
Herramienta que facilita el mapeo de los límites del campo, propiedades cartográficas del suelo, cartografía de los nutrientes del suelo y de las plantas, mapeo del volumen que presenta la maleza y el follaje, y mapeo de plagas (Yang & Lee, 2013).	En lugares con poca cobertura la recepción de la señal de parte de los satélites puede ser mínima o totalmente nula afectando la toma de información.
Por otra parte, los satélites de los GPS recogen información meteorológica que contribuye a los meteorólogos en el estudio del clima.	Problemas de exactitud en la toma de coordenadas. El clima tempestuoso causa la pérdida de señales en algunas zonas. Alto consumo energético.

4.3.2. Data-Loggers

Esta tecnología es ampliamente conocida y utilizada para el monitoreo de variables atmosféricas y agrícolas, entre otras. Son equipos capaces de capturar y almacenar

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

información en algún dispositivo de almacenamiento propio como las *EEPROM* (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) o memorias *SD* (*Secure Digital*) para un posterior análisis de los datos obtenidos, se realiza automáticamente en periodos constantes a lo largo del día. Se basan en microcontroladores y microprocesadores, que son alimentados por baterías portables, y los hay con interfaz local (pantalla *LCD* y teclado) y otros necesitan comunicarse con una computadora para facilitar la visualización de los datos, según (Ibrahim, 2010) y (Han et al., 2007). Normalmente estos equipos se instalan y se dejan sin supervisión, luego el usuario final debe recoger y extraer la información utilizando un computador, aunque algunos modelos actuales brindan la facilidad de acceder a los datos de manera remota a través de internet (Lozoya et al., 2016).

Entre las aplicaciones más utilizadas figuran: estaciones meteorológicas y boyas marinas para el registro de datos meteorológicos, estudio de fauna salvaje, controlador de automóviles para identificar posibles fallas, registro de datos de la travesía en barcos de gran o mediano calado, sistemas automáticos de riego y sistema de monitoreo de humedad del suelo, entre otras. Donde es indispensable mantener una monitorización constante de los datos del medio u objeto en estudio (Lozoya et al., 2016) y (Sensores-de-medida.es, 2017). Todas estas implementaciones involucran el uso de la tecnología *Data-Logger*, pero son soluciones específicas para las necesidades inmediatas que presenta cada caso. No se aprecia el uso de un sistema escalable e incremental capaz de adaptarse a diferentes necesidades presentes en la agricultura de precisión.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual



Figura 4-9 Data-Loggers - MSR.
Fuente: (MSR Electronics, 2016)



Figura 4-10 Data-Loggers - Decagon Devices.
Fuente: (Decagon Devices, 2015)

Tabla 4-4 Ventajas y desventajas de la tecnología Data-Loggers.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología confiable. • Robusta. • Precisa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de flexibilidad, generalmente se configuran para monitoreo de variables específicas. • Poca escalabilidad al presentar dificultades para integrarse con otros dispositivos o computadoras. • Poca conectividad al no proporcionar información sobre los protocolos de comunicación y el acceso a los datos utilizados.

Fuente: (Lozoya et al., 2016)

4.3.3. Wireless Sensor Network – WSN

Las desventajas que presentan *GPS* y *Data-Loggers* son suplidas por las conocidas redes de sensores inalámbricas o *Wireless Sensor Network (WSN)*. Son dispositivos (sensores) autónomos, distribuidos en un área específica a gran o pequeña escala. Son capaces de procesar y transmitir información de manera remota a través del espectro electromagnético, de una manera efectiva y sin pérdida de datos, para el estudio de variables físicas o condiciones ambientales en tiempo real (Buratti et al., 2009).

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Por la facilidad y los bajos costos de implementación ante redes cableadas, pueden ser utilizadas para diferentes aplicaciones como, militares, médicas, domótica y estudio del medio ambiente, entre otras. Ya que pueden abarcar grandes terrenos para su análisis y estudio (R. Fernández, J. Ordieres, F. Martínez, A. González, F. Alba, R. Lostado, 2009).

La agricultura de precisión es una aplicación que puede utilizar la *WSN* para el control de riego, indispensable en lugares escasos de agua y donde se debe emplear eficientemente este recurso. También en el control de la distribución del fertilizante por medio de dispositivos automatizados. O en la monitorización de variables atmosféricas como: temperatura, humedad relativa, presión, entre otras y variables agrícolas como: humedad del suelo, grosor del tallo de las plantas, radiación fotosintéticamente activa, etc. De acuerdo a lo indicado en (Aqeel-ur-Rehman et al., 2014), (Cedeño et al., 2014) y (Buratti et al., 2009).

Las *WSN* están constituidas por los siguientes componentes: sensores, nodos sensores, *Gateway*, estación base y la infraestructura de la red inalámbrica que propicia la conectividad entre estos componentes (Mahmoud, 2013).

Los **sensores** son dispositivos electrónicos encargados de captar variables físicas y convertirlas en señales eléctricas para su posterior estudio y análisis. Los **nodos sensores**, envía los datos obtenidos por el sensor hacia la estación base. El *Gateway* se encarga de enlazar redes diferentes (una red *WSN* con una red *TCP/IP*). La **estación base** recolecta datos obtenidos por diferentes sensores, y está basada en un sistema de cómputo o un sistema embebido (Mahmoud, 2013).

La **red inalámbrica** posibilita la interconexión de varios dispositivos electrónicos (nodos sensores o motas), dotados con capacidad de cómputo, coste moderado y baja

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

potencia, lo que permite su operación sin la necesidad de proveedores externos, interconectándose entre sí, sin que exista línea de vista entre ellos, a través del uso de diferentes protocolos de comunicación como *Bluetooth*, *Wifi*, *ZigBee*, *IEEE 802.15.4*, *6LoWPAN*, *RPL*, tal como lo indican (Gaddour et al., 2012), (Cama et al., 2012) y (Proskochoylo et al., 2015).

La **topología de red** define el diseño de distribución de los nodos y el Gateway. A continuación, se detallan las principales topologías según (Abd-El-Barr, Youssef, & Al-Otaibi, 2005) y (Nack, 2010).

Estrella con un solo salto (*Single-hop star*): Comunicación directa de cada nodo al *Gateway*. Facilita el diseño, pero disminuye la escalabilidad y robustez de la red debido a que los nodos más alejados del *Gateway* presentan poca estabilidad en los enlaces. Ver figura 4-11.

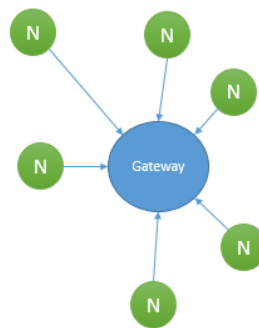


Figura 4-11 Topología Single-hop star.
Fuente: (Caicedo – Ortiz, J).

Malla y cuadrícula multisaltos (*Multi-hop mesh and grid*): La información es transmitida de nodo a nodo hasta llegar al *Gateway*, cubriéndose un área mayor. Ver figura 4-12 y 4-13.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

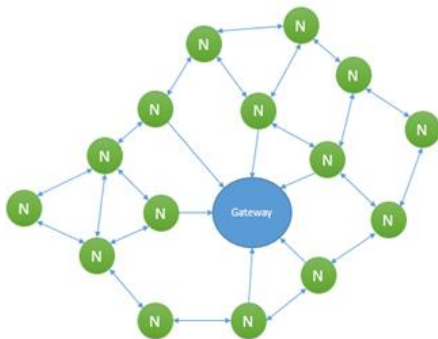


Figura 4-12 Topología en malla con multisaltos, (multi-hop mesh).

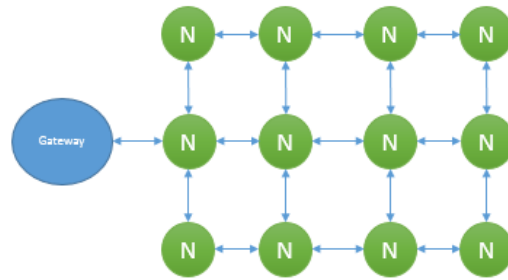


Figura 4-13 Topología en cuadrícula con multisaltos (multi-hop grid).

Fuente: (Caicedo–Ortiz, J).

Clúster jerárquico de dos niveles (*Two-tier hierarchical cluster*): Conocida como agrupamiento jerárquico de dos niveles. Los nodos envían la información a un nodo jefe conocido como cabeza del clúster (*cluster head*) y este a su vez establece una red con otros cabezas de clúster de áreas diferentes. Figura 4-14.

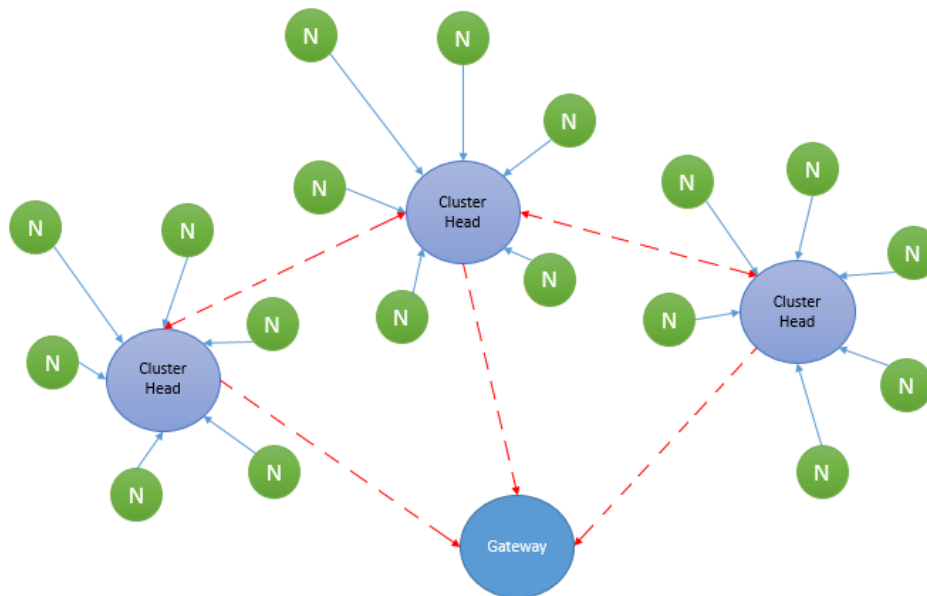


Figura 4-14 Topología Clúster jerárquico de dos niveles (Two-tier hierarchical cluster).

Fuente: (Caicedo–Ortiz, J).

Una característica destacada de las WSN es la capacidad de auto restauración, es decir, que en el caso en que un nodo sensor falle porque se agotó su energía o surgió algún

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

daño, la propia red será la encargada de encontrar vías alternas para la transmisión de la información hasta la estación base. Otra característica, es la integración que permite interactuar con otras tecnologías ya sean inalámbricas o cableadas. En la figura 4-15 se aprecian diferentes nodos sensores para WSN (Md Zin, Badrul Anuar, Laiha Mat Kiah, & Khan Pathan, 2014).



Figura 4-15 Ejemplos de nodos sensores, de izquierda a derecha TelosB Empresa Memsic , Z1 empresa Zolertia y Waspote empresa Libelium.
Fuente: TelosB, (MEMESIC, 2016), Z1 (Zolertia, 2010) y Waspote (“Libelium,” 2011)

Tabla 4-5 Ventajas y desventajas de las WSN.

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
El bajo consumo de energía que alarga el tiempo de vida en sus baterías.	Capacidad de cómputo y memoria limitados por el hardware.
A través de redes multisalto o multidifusión (<i>multicast</i>) se puede ampliar su cobertura de operación.	Dado que el ahorro del consumo energético varía de acuerdo a muchos factores como los protocolos de enrutamiento, los sensores y aplicaciones entre otras, se han desarrollado múltiples investigaciones buscando soluciones en el mejoramiento o desarrollo de nuevos protocolos. Este es un debate que sigue abierto y sujeto a discusión.
Bajos costos y facilidad de implementación. Tiempo de respuestas rápidas.	Redes desatendidas que pueden sufrir fallos.
Precisión y frecuencia de las mediciones que se configuran programando los nodos sensores.	

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Es importante resaltar, que para solucionar el caso de nodos en los que se agota muy rápidamente la batería, se han encontrado soluciones alternativas como el uso de pequeños paneles solares que suministren energía a las baterías recargables instaladas en el nodo sensor (Kodali & Rawat, 2013a) (José Manuel Linares Arenas, 2014) (Vunabandi, Markon, & Willy, 2015).

Las WSN se perfilan como una de las tecnologías más importantes en la agricultura del siglo XXI, por el bajo costo de implementación, por ser una solución sencilla y rentable para la monitorización de las variables que inciden sobre los cultivos, para una toma de decisión acertada y objetiva por parte del agricultor, tal como lo indican (Santoshkumar & Udaykumar R.Y, 2015), (Xuemei Li, Yuyan Deng, & Lixing Ding, 2008) y (Jiber et al., 2011).

4.3.4. Protocolos de comunicación

Para el correcto diseño del prototipo de la WSN se deben analizar los aspectos principales que conforman la misma, teniendo como referente los protocolos de comunicación comúnmente utilizados para redes inalámbricas de bajo consumo energético, tales como: el 802.15.4, *6LoWPAN*, *CoAP* y *RPL*.

4.3.4.1. Protocolo 802.15.4

Definido en (Standards.ieee.org, 2017) y (IEEE-SA & SOCIETY, 2011), fue publicado en el año 2003, con revisiones en *IEEE 802.15.4-2006* e *IEEE 802.15.4-2011 Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. Se basa en la Capa 1 del modelo OSI, encargada de interactuar con el medio físico para la transmisión de datos, y en la subcapa de la Capa 2 del modelo *OSI*, encargada de facilitar el acceso a los canales físicos.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Utiliza *CSMA/CA* (acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones) y brinda comunicación e interconexión inalámbrica entre dispositivos que operen en las bandas de comunicación no licenciadas que deban tener baja tasa de transmisión de datos, bajo consumo energético, frecuencias de radio de corto alcance, bajo costo y facilidad de implementación. Ver figura 4-16.

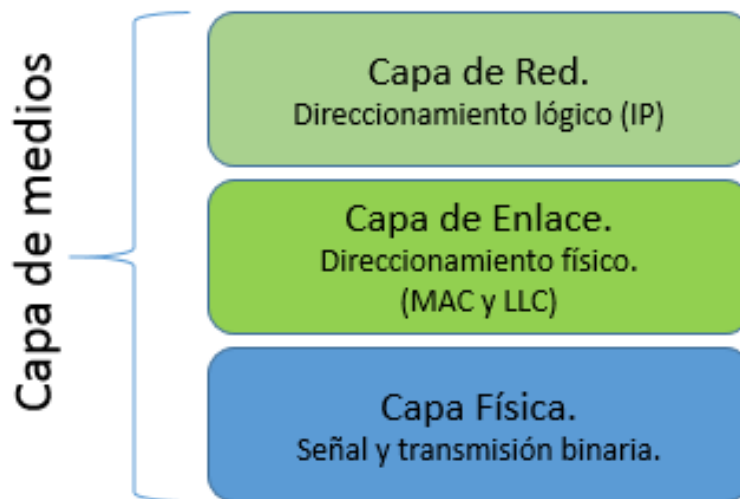


Figura 4-16 Capa de medios del modelo OSI.
Fuente: Diseño del autor (Caicedo – Ortiz, J).

Tabla 4-6 Resumen de las funciones de la Capa Física y Sub Capa MAC.

<i>Capa Física</i>	<i>Capa MAC</i>
Activa o desactiva el transceptor de radio	Genera las señales guía (Nodo coordinador)
Evalúa el nivel de potencia de los paquetes recibidos y establece un indicador de calidad del enlace.	Servicios de seguridad variados.
Valora el canal libre para uso de la capa <i>MAC</i> .	Uso de <i>CSMA/CA</i> para acceso al canal.
Elige el canal de frecuencia para operar.	En la red <i>PAN</i> administra la asociación y des-asociación entre nodos, al igual que las ranuras de tiempo dedicadas.
Realiza la transmisión de los mensajes a través del canal físico.	Confirmación de recepción de los datos, enviando tramas de acuse de recibido.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

4.3.4.1.1. Dispositivos en una red con protocolo *IEEE 802.15.4*.

Según (IEEE-SA & SOCIETY, 2011), los dispositivos que componen una red con protocolo IEEE 80215.4 se dividen en dos tipos de acuerdo a sus características de hardware y software, los FFD (Full Function Devices) y los RFD (Reduce Function Devices).

FFD es un dispositivo con funcionalidad completa, que puede hacer uso de todos los servicios de la Sub-Capa *MAC*. Por lo tanto, es capaz de operar como coordinador de la red *PAN* (*Personal Area Network en español Red de área personal*) o como un nodo común. Puede actuar como un coordinador y proporcionar servicios de sincronización con otros nodos u otros coordinadores.

RFD es un dispositivo con funcionalidad reducida, limitados en hardware. Por lo que no pueden hacer uso de todos los servicios de la Sub-Capa *MAC*. Están diseñados para aplicaciones que son extremadamente simples y no necesita enviar grandes cantidades de datos. Solo pueden estar asociados a un *FFD*.

Con estos dos dispositivos es posible crear las dos topologías que brinda *IEEE 802.15.4*, en estrella y par a par, ver figura 4-17. La primera se compone de un nodo central *FFD* como coordinador *PAN*, encargado del inicio de la transmisión y direccionamiento de los mensajes. Los nodos conectados a este pueden ser *RFD* o *FFD*. Mientras que en la segunda todos los nodos pueden comunicarse entre sí siempre y cuando se encuentren dentro del rango de cobertura de los nodos adyacentes, en esta última topología se designa a un coordinador *PAN*, el cual es el primer nodo en utilizar el canal para la comunicación.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

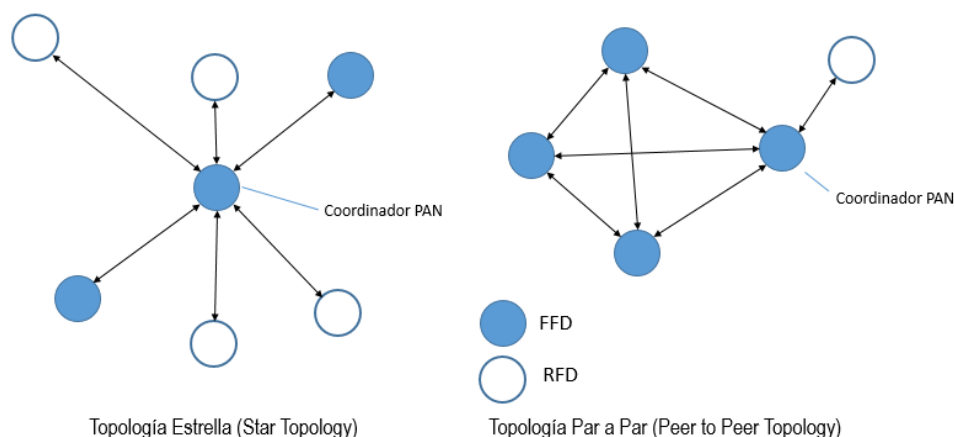


Figura 4-17 Topologías en estrella y par a par.
Fuente: (IEEE-SA & SOCIETY, 2011)

Este protocolo opera en bandas no licenciadas de acuerdo a la región geográfica donde se implemente. En la tabla 4-7 se presenta un resumen de las características principales de cada banda de frecuencia.

Tabla 4-7 Características de las bandas de frecuencia del protocolo IEEE 802.15.4

<i>Frecuencia (MHz)</i>	<i>Banda de Frecuencia (MHz)</i>	<i>Tasa de Datos (Kbps)</i>	<i>Numeración de Canales</i>	<i>Modulación</i>	<i>Región</i>
868.3	868–868.6	20	0	BPSK	Europa
915	902–928	40	1 – 10	BPSK	Norteamérica, Australia, Colombia.
2400	2400–2483.5	250	11 – 26	O-QPSK	Mundo

El protocolo IEEE 802.15.4 es utilizado en aplicaciones enfocadas al monitoreo y automatización, para el monitoreo variables dentro de recintos cerrados o al aire libre, en el caso de cultivos y sistemas de riego automatizados según (Standards.ieee.org, 2017) e (IEEE-SA & SOCIETY, 2011).

4.3.4.2. Protocolo 6LoWPAN

IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN), lo que traduce IPv6 para redes de área personal inalámbricas de bajo consumo, cuyas

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

especificaciones están definidas en el documento RFC 4944 de la *IETF (Internet Engineering Task Force)*, para mayor información puede consultarse (Kushalnagar, Montenegro, Culler, & Hui, 2007) y (Hui & Thubert, 2011). Este protocolo permite el uso de direcciones *Ipv6* en redes que operan bajo el estándar *IEEE 802.15.4*, contribuyendo en la comunicación entre dispositivos *IP* y nodos con baja capacidad de procesamiento y consumo energético dentro de una red inalámbrica (Rukpakavong, Phillips, Guan, & Oikonomou, 2012), ideal para el *IoT (Internet of Things)* y las conocidas *LLNs Low power and Lossy networks* o redes de baja potencia y pérdida.

Las direcciones *IP* manejadas por *IPv6* se establecen utilizando 128 bits a diferencia de *IPv4* que utiliza 32 bits y que en la actualidad ya se encuentran agotadas, problemática que se ha solucionado con *IPv6* ya que este puede proporcionar hasta 667×10^{21} direcciones (Cama et al., 2012) y (Beeharry & Nowbutsing, 2016). En la figura 4-18 se puede observar el esquema de una red con *IPv6*.

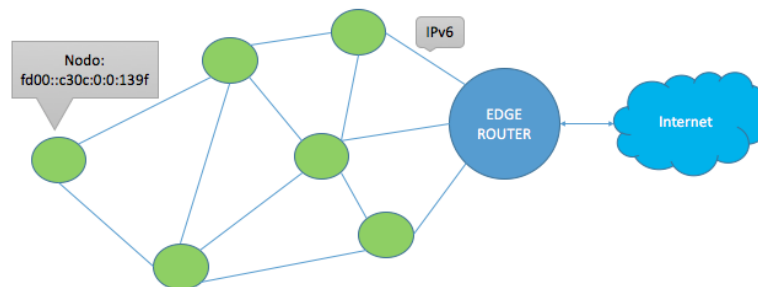


Figura 4-18 Modelo red 6LoWPAN con Edge Router.
Fuente: (Caicedo – Ortiz, J).

4.3.4.2.1. Pila del Protocolo 6LoWPAN

La pila del protocolo 6LoWPAN cuenta con una capa denominada “Capa de Adaptación” o intermedia, ubicada entre la capa *MAC* y de *RED*, según (Schumacher,

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Kushalnagar, & Montenegro, 2007) y (Hui & Thubert, 2011), lo cual se hizo, con el propósito de tratar los requerimientos impuestos por IPv6, como el incremento de las direcciones *IP* y el aumento del *MTU* (*Maximum Transmission Unit*) establecido en 1280 *bytes*. Atendiendo a su vez las solicitudes realizadas por las capas inferiores. En la figura 4-19, se puede apreciar la pila de *6LoWPAN* y la capa de adaptación.

La pila del protocolo *6LoWPAN* se encuentra conformada de acuerdo a (Braden, 1989) por las siguientes capas (Piñeres-Espitia, 2015) y (Chen et al., 2011):

- Capa de aplicación, donde se llevan a cabo los servicios utilizados por el usuario de acuerdo a la red.
- Capa de transporte, dividida entre el protocolo *UDP* y el *ICMP*.
- Capa de red, complementada con el protocolo *RPL*, y es la encargada del direccionamiento *IPv6*.
- Capa enlace de datos o *MAC*, conformada por el estándar *IEEE 802.15.4*.
- Capa física descrita por el estándar *IEEE 802.15.4*



Figura 4-19 Pila del protocolo 6LoWPAN.

Fuente: (Caicedo – Ortiz, J).

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

4.3.4.2.2. Tipos de direcciones IPv6

Las direcciones utilizadas por el protocolo *6LoWPAN* se clasifican, según (Hinden & Deering, 2003) y (Colina, Vives, Zennaro, Bagula, & Pietrosevoli, 2016), en:

Unicast: Es un identificador de dirección para una única interfaz. Es decir, el paquete enviado solo es entregado a la interfaz o nodo destino definido.

Multicast: (Punto a Multipunto), utilizada para enviar un paquete desde la fuente a muchos destinos haciendo uso del enrutamiento multidifusión.

Anycast: (Punto a nodo más cercano) Se utiliza para enviar información desde la fuente hasta el nodo más cercano dentro de un grupo.

Reserved: Direcciones para uso especial definido.

4.3.4.2.3. Cabecera del protocolo IPv6

El protocolo *IPv6* define un conjunto de encabezados los cuales se pueden observar en la figura 4-20, y son descritos a continuación, sin embargo, para una mayor comprensión de la estructura de la cabecera *IPv6*, podrá consultar (S Deering & R Hinden, 1998).

Versión: Define la versión del protocolo si es *IPv4* o *IPv6*.

Clase de tráfico: Aquí se define la prioridad del paquete enviado respecto a los demás paquetes enviados por el mismo remitente. Sirve para almacenar la información de precedencia o clase de servicio de acuerdo a la implementación de *QoS* (*Quality of Service*).

Etiqueta de flujo: Hace referencia a los paquetes que necesitan de un tratamiento especial por parte de los *routers*, como los servicios de alta calidad o los manejados en tiempo real. El flujo conformado por varios paquetes se caracteriza por tener valores

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

similares en los campos de dirección origen, prioridad, etiqueta de flujo y dirección de destino.

Longitud de carga útil: Define el tamaño de la carga útil utilizando dos (2) bytes sin tener en cuenta la longitud del encabezado cuyo valor máximo es 65.536. Es decir, el tamaño del paquete máximo en octetos que puede transportarse en un enlace. Maneja la opción Jumbograma cuando su valor es 0.

Siguiente cabecera: Se encarga de identificar el encabezado siguiente en el mismo datagrama.

Límite de saltos: Reemplazando al *TTL (Time To Live)* en *IPv4*. Es un entero sin signo decrementado en una unidad con cada nodo que reenvía el paquete, cuando el límite de saltos se decrementa hasta cero, el paquete es descartado.

Dirección de fuente: Contiene la dirección del nodo fuente que envía el paquete, almacenada en 128 *bits*.

Dirección de destino: Contiene la dirección del nodo destino que recibe el paquete, almacenada en 128 *bits*.

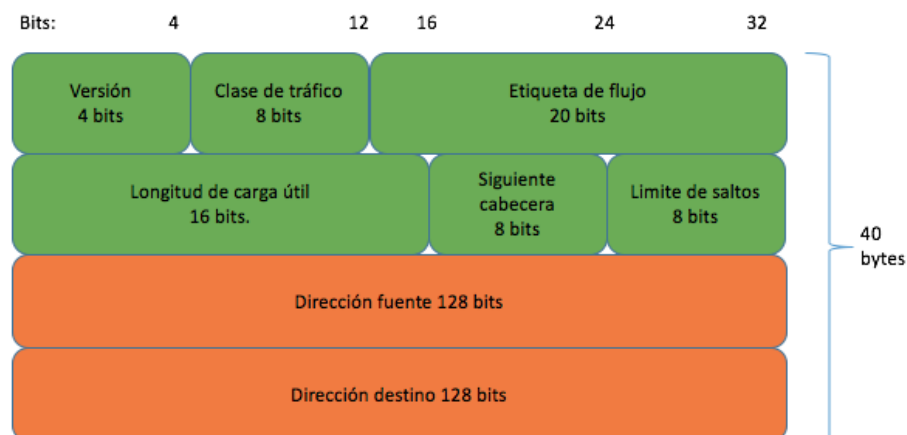


Figura 4-20 Cabecera del protocolo IPv6.

Fuente: (Caicedo–Ortiz, J).

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Según (Suryady et al., 2011), utilizar el protocolo *IPv6* para aplicaciones en redes de sensores ofrece como ventaja la facilidad de conexión con otras redes que utilicen direcciones *IP*. Las tecnologías basadas en *IP* ya son conocidas y han demostrado su funcionamiento alrededor del planeta, y han sido ampliamente documentadas. Por lo tanto, esta tecnología es una buena opción para implementaciones en el ámbito de la agricultura de precisión.

4.3.4.3. Protocolo *CoAP*

Es uno de los protocolos desarrollados para el Internet de las cosas, al igual que *RPL*. La sigla *CoAP* significa “*Constrained Application Protocol*”, que traduce protocolo de aplicación restringida. Es un protocolo a nivel de software que se implementa en dispositivos electrónicos facilitando la comunicación a través de internet, ofreciendo además servicios web orientados a la arquitectura, siendo muy útil para el desarrollo de plataformas web y en general, en procesos de comunicación en internet.

“Es un protocolo especializado para el uso de nodos inalámbricos restringidos y limitados de baja potencia, que pueden comunicarse de forma interactiva a través de internet, su modelo de interacción cliente/servidor es similar al de *http*, con la diferencia que *CoAP* realiza estas interacciones (intercambios de mensajes) de forma asíncrona por medio del protocolo de transporte *UDP*” (Castro Heredia, 2014). Una representación del funcionamiento de este protocolo se ilustra en la figura 4-21.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

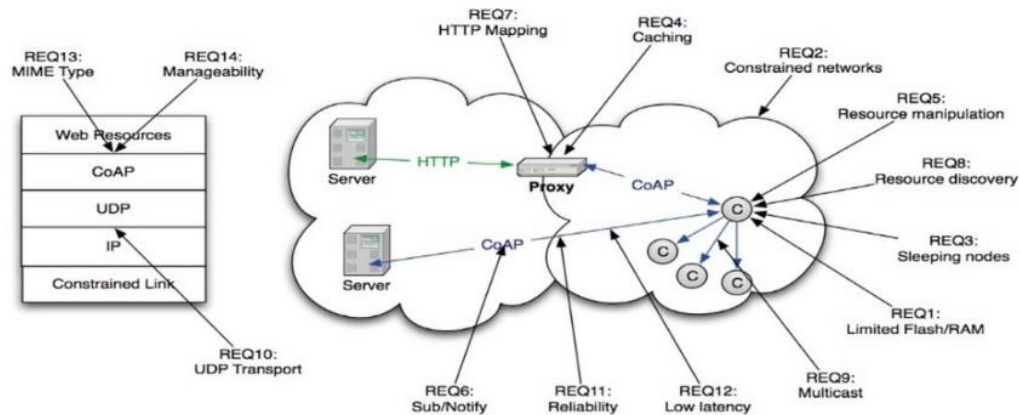


Figura 4-21 Capa y diseño del protocolo CoAP.

Fuente: (Peniak & Franekova, 2016)

Las principales características del protocolo *CoAP*, son las siguientes:

- Favorece el intercambio de mensajes asíncronos.
- Baja sobrecarga de cabeceras para reducir la complejidad al analizar el mensaje.
- Reduce sobrecargas *TCP*.
- Traduce fácilmente a *HTTP* la integración simplificada con la web.
- Protocolo especializado en *IoT*.
- Permite el transporte *UDP* con capa de aplicación fiable.
- Reducción de la cabecera.
- Descubrimiento opcional de recursos.
- Mapeo *HTTP* sin estado a *CoAP*.
- Soporte de proxy *HTTP / CoAP* con almacenamiento en caché.

En (Peniak & Franekova, 2016) se aprecia el desarrollo de un modelo de integración de sistemas embebidos a partir del protocolo *CoAP* para el internet de las cosas. Que surge como solución a los inconvenientes que presenta la comunicación jerárquica tradicional entre varios dispositivos integrados. *CoAP* es seleccionado para cumplir y permitir la

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

integración global entre los Sistemas embebidos e internet, y gracias al buen desempeño obtenido es presentado como una opción capaz de satisfacer las expectativas de integración global entre los sistemas integrados e internet, dado que no requiere de un "Nodo central" y permite la comunicación de todos los dispositivos a través del protocolo Solicitud-Respuesta, funcionando en equipos con recursos limitados en hardware y capacidades de procesamiento de datos.

El potencial del protocolo *CoAP* también se puede justificar en aplicaciones donde se requieran sensores. En la Escuela de Ciencias de la Computación e Ingeniería de la Universidad de Tecnología del sur de China (Mei & Xiao, 2016), se implementó un sistema de seguridad en empresas, por medio de sensores, a raíz de los accidentes que éstas sufren, debido a fugas de gases y explosiones. Se utilizaron sensores para el monitoreo de las instalaciones internas de la empresa, el sensor de humo *MQ-2*, el sensor de temperatura *DS18B20* y el de gas *MQ-5*. Los sensores permitieron la captación de información acerca del estado de las instalaciones internas de la empresa. Mediante el uso del protocolo *CoAP* se logró disminuir la transmisión de datos a través de los sensores y mejorar la tasa de carga efectiva en la red.

4.3.4.4. Protocolo RPL

Antes de iniciar con un breve análisis de este protocolo es indispensable conocer algunos conceptos claves para su entendimiento, ver tabla 4-8.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Tabla 4-8 Conceptos relacionados con el protocolo RPL.

<i>DAG Directed Acyclic Graph</i>	Grafo orientado que no admite bucles en el que los vértices están en caminos orientados hacia uno o varios nodos raíz.
<i>DAG ROOT</i>	Es un nodo del <i>DAG</i> sin bordes salientes en la <i>red</i> . Todos los <i>DAG</i> deben contar con mínimo un nodo <i>root</i> .
<i>DODAG DESTINATION ORIENTED DAG</i>	Es un <i>DAG</i> con un único nodo <i>root</i> .
<i>SUB-DODAG</i>	Es el conjunto de nodos que para poder llegar hasta el nodo raíz debe pasar a través de él. Los nodos pertenecientes al sub- <i>DODAG</i> tienen rangos superiores al de este.
<i>DIO (DODAG Information Object)</i>	Esta información es enviada por cada nodo permitiendo conocer la información sobre el <i>DODAG</i> . De esta forma cada nodo puede conocer a sus vecinos y el rango en el que estos se encuentran.
<i>DAO (Destination Advertisement Object)</i>	Esto se usa para enviar información de direccionamiento desde abajo del árbol de una red <i>RPL</i> hacia la parte superior del mismo, alimentando las tablas de ruteo de los nodos superiores o padres.
<i>DIS (DODAG Information Solicitation Message)</i>	Se utilizan para descubrir los nodos <i>DODAGs</i> cerca y solicitar los <i>DIOs</i> en la red <i>RPL</i> .

El *RPL (Routing Protocol Low-Power and Lossy Networks)*, es un protocolo enfocado a las redes de baja potencia y pérdidas (*LLNs*) compuestas por dispositivos con baja capacidad de procesamiento, memoria y consumo energético tal como se indica en (T. Winter et al., 2012). Estas características se presentan como un reto para la *Internet Engineering Task Force (IETF)* la cual funda en el año 2008 un nuevo grupo denominado “*Routing Over Low power and Lossy networks (ROLL)*”. Como *6LoWPAN* e *IEEE 802.15.4* no definen protocolos de enrutamiento para la transferencia de datos multisaltos, se realizaron pruebas comparativas con otros protocolos como *AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector)* y *DYMO (Dynamic MANET On-demand)* para brindar una solución a esta

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

problemática pero los resultados esperados no eran los deseados por lo tanto se crea RPL en el mes de agosto del año 2009 (Felsche, Huhn, & Schwetlick, 2012). Este protocolo es clave en la transferencia de datos a través de enlaces multi-saltos, siendo eficiente en la búsqueda de caminos para enrutamientos definidos de datos a través de tres tipos de patrones de tráfico: multipunto a punto (*MP2P*), punto a multipunto (*P2MP*) y punto a punto (*P2P*) según (H. R. Kermajani & Gomez, 2011) y (Cama et al., 2012).

Este protocolo se basa en un árbol de seguimiento de datos, utilizando un concepto denominado Grafo Acíclico Dirigido, por sus siglas en inglés *DAG*. Tiene un árbol de datos, y establece para cada red cientos de nodos, que pueden estar asociados entre sí.

Las distribuciones de los nodos dependen de un nodo principal, llamado nodo raíz, que concentra la recepción de los datos provenientes de los otros nodos de la red, a esta estructura se le denomina *DODAG* o *RPL DODAG*, en inglés *Destiny Oriented Dirigid Acyclic Graph*. Así mismo, la red de todo el árbol puede estar conformada por varios *DODAG*, ver figuras 4-22 y 4-23.

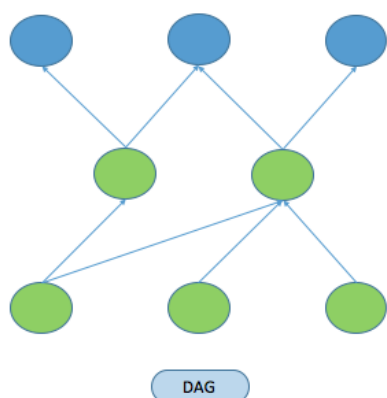


Figura 4-22 Red RPL DAG con múltiples DODAG.

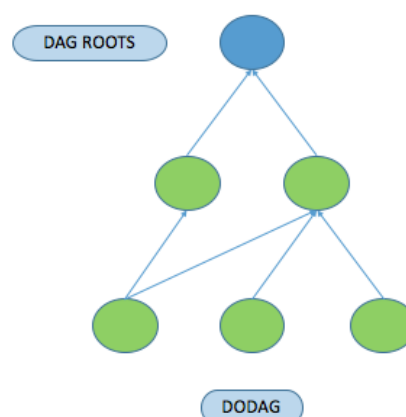


Figura 4-23 Red RPL DAG con múltiples DODAG.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Se otorga una dirección *IPv6* a los dispositivos que trabajan con el protocolo *RPL*, luego intentan enlazarse a un *DODAG* por medio de un mensaje de información de objetos *DODAG (DIO)*, como se aprecia en la figura 4-24 Posteriormente para seleccionar a su *RPL DODAG* (Nodo padre), crean un sub *DODAG* que sirve como intermediario en la comunicación con los nodos inferiores (Nodos con numeración 2 en la figura 4-25) y el *RPL DODAG*, por lo tanto, se manejan rangos de jerarquía por cada nivel de conexión en la red tomando como punto de referencia al padre, como se visualiza en los nodos con numeración 2, 3 y 4 de las figuras 4-25; 4-26, 4-27.

Cuando se trata de una comunicación multipunto a punto (*MP2P*), cada nodo almacena la información para llegar al siguiente salto que le permite alcanzar al nodo padre, lográndolo a través del intercambio de mensajes *DIO*. En punto a multipunto (*P2MP*) y punto a punto (*P2P*), *RPL* dispone de rutas separadas hacia abajo de la red (es decir, desde el nodo con numeración 4 hacia el 1 como se aprecia en la figura 4-26) utilizando un *Destination Advertisement Object* por sus siglas *DAO* u Objeto de Anuncio de Destino. Estos se encargan de anunciar las rutas de los diferentes destinos dentro de la red, según lo planteado por (Jeonggil Ko et al., 2011) y (Ko, Dawson-Haggerty, Gnawali, Culler, & Terzis, 2011). Cuando se envía un mensaje *DAO*, cada nodo almacena la ruta para saber llegar al nodo padre (*RPL DODAG*) por donde finalmente viajará la información útil. Tal como se aprecia en las figuras 4-24; 4-25; 4-26; 4-27.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

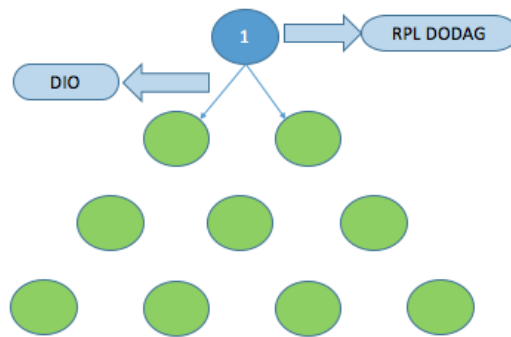


Figura 4-24 Estructura multipunto-punto red RPL, envío del DIO por parte del nodo RPL DODAG.
Fuente: (Jeferson Cotrim, 2016)

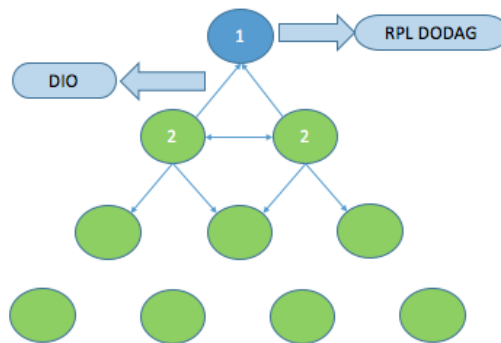


Figura 4-25 Estructura multipunto-punto red RPL, envío del DIO por parte del nodo RPL DODAG.
Fuente: (Jeferson Cotrim, 2016)

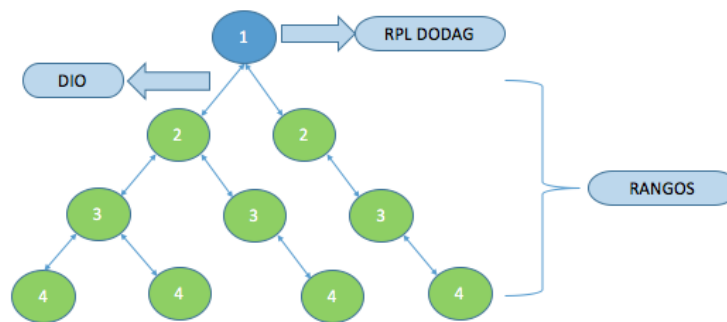


Figura 4-26 Rangos definidos y selección de rutas por cada nodo.
Fuente: (Jeferson Cotrim, 2016)

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

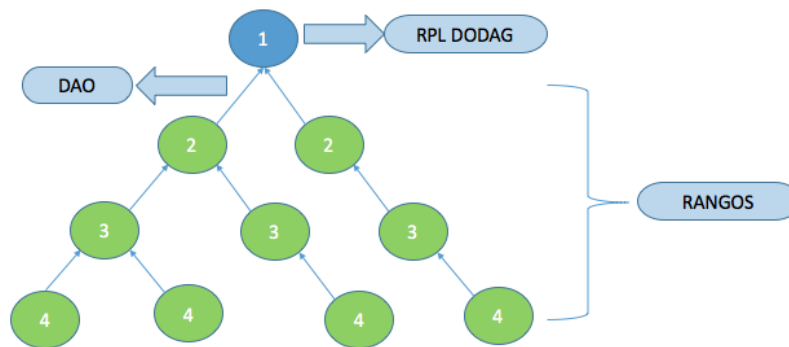


Figura 4-27 Envío de mensaje DAO desde los nodos 4-3-2 al RPL DODAG (nodo 1) para establecer la ruta de envío.

Fuente: (Jeferson Cotrim, 2016)

Gracias a la distribución y correcta programación del protocolo RPL destacan las siguientes características (Tsvetkov, 2011):

- La configuración del protocolo se realiza de manera automática.
- Al detectar una falla en algún nodo, la información se trasmite de manera automática a través de otros nodos.
- El sistema de árbol permite detectar bucles automáticos y corregirlos de forma que no afecte la información recolectada.
- Como el sistema de nodos son independientes entre sí en el momento de la toma de datos, el despliegue puede abarcar una gran área de terreno sin pérdidas significativa de información.
- Se pueden encontrar variedades de *Border Router* o Enrutadores de Frontera disponibles para el sistema del protocolo *RPL*, estos enrutadores son utilizados para conectar un sistema autónomo con una red privada o con la nube. Algunas denominaciones de *routers* son: *Routers* (se utilizan típicamente para enlazar dos redes distintas), *Border Routers* (situado cerca de la frontera entre las zonas uno o más *Open*

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Shortest Path First - OSPF, para comunicarse con un *ISP - Internet Service Provider*) y los *Routers* anfitriones (para transportar el tráfico entre los *routers* de borde).

Destaca como principal ventaja del protocolo *RPL*, la adquisición de datos en un espacio grande con algunas diferencias notables ante otros sistemas que pueden hacer lo mismo:

- Los datos obtenidos no se distorsionan en la distribución de nodos.
- La red es mucho más fácil de montar en el espacio a trabajar.
- La red no detiene la recolección de datos, al momento de presentarse algún fallo intenta corregirlo luego de ubicarlo en la red.
- Facilidad para cambiar un nodo que presenta fallas en la red.
- Enfocado a dispositivos con baja capacidad de procesamiento, memoria y consumo energético.

El protocolo de enrutamiento *RPL* provee un sistema multipunto que facilita el tráfico de información en áreas amplias, por su facilidad de despliegue, autoconfiguración, autoreparación de rutas y bajo consumo energético. Estas son algunas de las características que lo perfilan como una buena opción de implementación, para el diseño de red, en la monitorización de cultivos de yuca. Considerando que la red se debe desplegar en terrenos de amplio tamaño. Asimismo, este protocolo en conjunto con el estándar *6LoWPAN* e *IEEE 802.15.4* se pueden integrar en el concepto de *IoT (Internet of Things* o Internet de los Objetos) ofreciendo un repertorio de nuevas actividades en la vida diaria del ser humano.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

4.3.5. Internet de las Cosas - IOT

El *IoT* también conocido como el Internet de los Objetos, fue el nombre que le acuñó Kevin Ashton, investigador del *MIT* en 1999, a la interconexión digital de los objetos que nos rodean a través de Internet. Dotándolos de una dirección IP que le permitan a cualquier persona, desde cualquier lugar y en cualquier momento, poder acceder a la información e incluso controlar dispositivos de manera remota, pudiendo establecer redes de intercambio de información con otros dispositivos pertenecientes a redes diferentes, tal como se indica en (Colina et al., 2016).

El *IoT* representa una nueva evolución del internet y gracias a su integración con objetos cotidianos capaces de coleccionar y distribuir datos, para su posterior almacenamiento, preprocesamiento y análisis; permite generar información a través del uso de herramientas de *BigData*. Desde esta perspectiva el *IoT* se proyecta como una revolución tecnológica que combinando hardware, software e internet facilitará el entendimiento del entorno que nos rodea, generando múltiples e innovadoras aplicaciones para contribuir a mejorar la calidad de vida del ser humano (Evans, 2011). La figura 4-28 representa el conglomerado de las aplicaciones que hacen parte del *IoT*.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

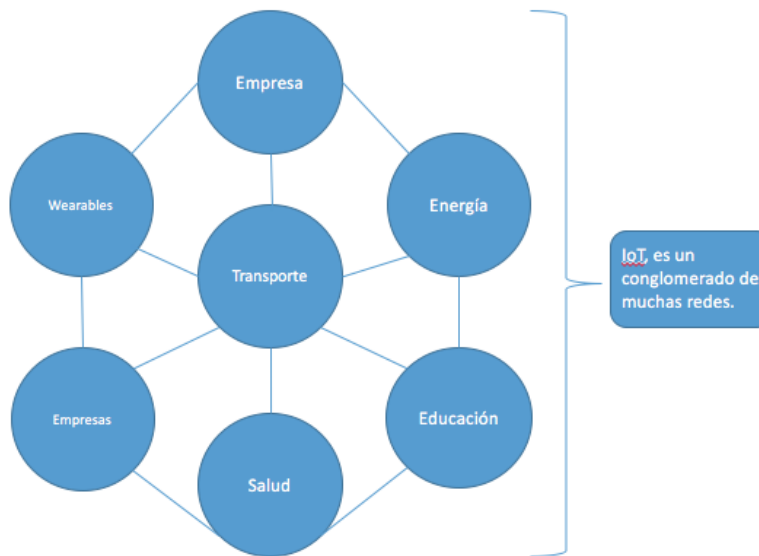


Figura 4-28 Internet de las cosas.
Fuente: (Caicedo – Ortiz, J).

El *IoT* nace entre 2008 y 2009 con la masificación de los dispositivos inteligentes como *Smartphones* y *Tablets*, que debido su facilidad de conexión a internet y a las diferentes aplicaciones que soportan, hace que sea infinito su ámbito de implementación. La figura 4-29 evidencia el exponencial crecimiento en conectividad de los dispositivos electrónicos, que se ha suscitado cada año. Un análisis comparativo de las tasas de crecimiento tanto de dispositivos conectados como de la población mundial, evidencia como la primera ha septuplicado a la segunda.

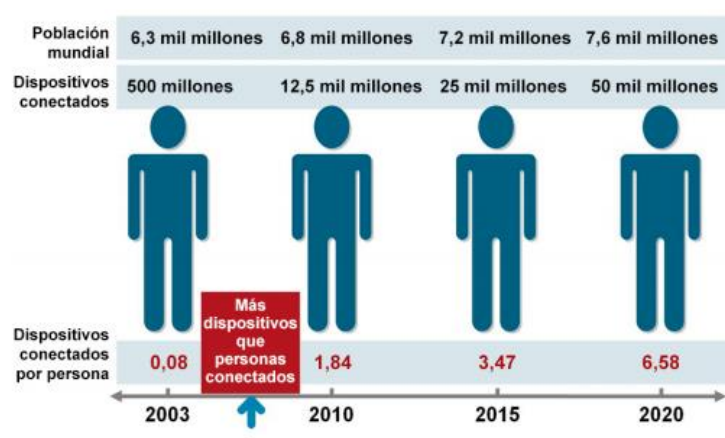


Figura 4-29 Relación población mundial respecto dispositivos conectados a internet.
Fuente: (Evans, 2011)

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

A pesar de los avances que se están logrando, aún existen retos no resueltos, que amenazan con retrasar el desarrollo del *IoT*, tales como: el diseño de fuentes de energía para la alimentación de miles de millones de sensores diminutos, la transición de *IPv4* a *IPv6* y la creación de normas y estándares que permitan regular el correcto funcionamiento de los equipos que se proyectan a futuro como parte del *IoT* (Evans, 2011).

Para aminorar estos inconvenientes se ha optado por la implementación, desarrollo e inclusive adaptación de sistemas operativos capaces de operar en dispositivos empotrados con limitaciones de hardware como memoria y capacidad de computo, brindando la oportunidad de establecer una comunicación entre equipos con un bajo consumo energético sin que esto afecte las propiedades de la red. En la siguiente sección se aprecia un análisis detallado de los dos sistemas operativos considerados entre los más utilizados, con mayor continuidad y soporte.

4.3.6. Sistemas operativos para plataformas de hardware en WSN

Como se ha mencionado, una red de sensores está compuesta por muchos nodos encargados del monitoreo de distintas variables. Cada nodo cuenta con un microcontrolador que en la mayoría de los casos posee una memoria limitada capaz de almacenar unos cuantos kilobytes, adicionalmente tienen transductores, módulos de radio, conversores análogos digitales, entre otros recursos que son alimentados por baterías o paneles solares. Los sistemas operativos gestionan y asignan estos recursos a los usuarios de una manera ordenada y controlada para el correcto funcionamiento de la red. Aunque existen distintos sistemas operativos para *WSN* se realizó un análisis comparativo solo de dos *Contiki* y

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

TinyOS por ser los más utilizados (Farooq & Kunz, 2011) y porque cuentan con suficiente documentación y comunidades activas de soporte disponibles.

4.3.6.1. Contiki

Es un sistema operativo que recibe su nombre de la famosa balsa *Kon-Tiki* utilizada por el explorador noruego Thor Heyerdahl en su expedición por el océano Pacífico en 1947 (Hornsby & Bail, 2009). Es de código abierto y se encuentra enfocado en el *IoT* y las *WSN* porque puede implementarse en sistemas basados en microcontroladores con baja capacidad de procesamiento y consumo energético, puesto que requiere solamente de dos (2) *KB* de *RAM* y 40 *KB* de *ROM* para su funcionamiento (Raju, Huddar, Tanwar, & Patwardhan, 2013). Adam Dunkels perteneciente al grupo de sistemas de redes embebidas del instituto sueco de ciencias computacionales, fue el principal desarrollador de la mayor parte de las funciones del núcleo, según (José Manuel Linares Arenas, 2014). *Contiki* es considerado como una herramienta potente en la construcción de sistemas inalámbricos complejos por su compatibilidad con los últimos estándares de comunicación inalámbrica como *6LoWPAN*, *RPL* y *CoAP*, cuenta con soporte para direccionamiento *IPv4* e *IPv6* facilitando la conexión a internet (Contiki-os.org, 2017).

Las características principales del sistema operativo *Contiki*, se listan a continuación, sin embargo, para una mayor descripción de las diversas funcionalidades del sistema, podrá consultar (Contiki-os.org, 2017) y (Farooq & Kunz, 2011).

- Diseñado para sistemas que cuenten con memoria disponible de unos pocos Kilobytes.
- Conexión en red a través de direccionamiento IP gracias a que cuenta con una pila de protocolos *IP* como *UDP*, *TCP* y *HTTP*.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

- Lenguaje de programación C estándar.
- Compatible con los protocolos de *IETF* enfocados a las redes de bajo consumo basadas en *IPv6* como *6LoWPAN*, *RPL* y *CoAP*.
- Cuenta con un simulador de red *Cooja* para realizar y depurar el código a utilizar en la red antes de programar el hardware.
- Compatibilidad con múltiples tipos de hardware.
- Arquitectura basada en procesos, eventos y *protothreads* para el ahorro de memoria en el hardware, conjuntamente hace uso de multi-hilos.
- No es necesaria la instalación de complejos sistemas de compilación.
- Comunidad activa dispuesta a colaborar en el desarrollo de código.

A continuación, se puede observar la estructura de un código desarrollado en *Contiki* en el que aprecia la estructura de trabajo basada en hilos:

```

/*-----*/
PROCESS (hello_world_process, "Hello world process");
AUTOSTART_PROCESSES (&hello_world_process);
/*-----*/

PROCESS_THREAD(hello_world_process, ev, data)
{

PROCESS_BEGIN ();
printf ("Hello, world\n");
PROCESS_END ();

}

```

4.3.6.2. TinyOS

Es un sistema operativo desarrollado por la Universidad de California en Berkeley, para plataformas inalámbricas con baja capacidad de procesamiento y consumo energético. Se encuentra escrito en lenguaje *nesC* (*Network Embedded Systems C*), en el que una

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

aplicación puede tener un tamaño de 15 *KB* y el sistema operativo ocupar tan solo 400 *bytes*, ya que cada programa se compila en conjunto con el sistema.

Se caracteriza por tener una arquitectura basada en componentes que facilitan la creación de aplicaciones al ensamblar módulos pre-existentes de librerías, o módulos nuevos creados por el programador brindando una rápida implementación al tiempo que se minimiza el código (TinyOS.stanford.edu, 2017). Además, cuenta con un modelo de concurrencia para controlar la sincronización en la ejecución de las múltiples tareas que puede llevar a cabo una mota como la captura, procesamiento, transmisión y enrutamiento de los datos.

Analizando ambos sistemas operativos (*Contiki* y *TinyOS*) basándose en lo fundamentado en (Tobias Reusing, 2012), surgen aspectos a considerar que facilitan la elección de cual se debe utilizar para el diseño del prototipo de red propuesto en esta investigación.

Tabla 4-9 Aspectos a considerar para la elección del Sistema Operativo.

<i>Aspectos a considerar</i>	<i>Contiki</i>	<i>TinyOS</i>
Manejo de los recursos limitados	Sí, pero posee un <i>Kernel</i> más complejo.	Si y además se desenvuelve de mejor manera bajo requerimientos con recursos menores.
Flexibilidad	Si, pudiendo incluso reemplazar de forma dinámica solo aquellos programas modificados de la aplicación.	Sí, pero necesita reemplazar todo incluyendo el sistema operativo.
Concurrencia	Maneja este aspecto por medio de la ejecución de eventos y también hace uso de diferentes librerías mediante multi-hilo.	Maneja este aspecto por medio de la ejecución de eventos.
Baja potencia	Utiliza mecanismos para optimización de la energía en los dispositivos implementados.	Utiliza mecanismos para optimización de la energía en los dispositivos implementados.

Fuente: (Caicedo – Ortiz, J).

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

En coherencia con lo anteriormente analizado, hay mínimas diferencias entre estos dos sistemas operativos, ambos pueden cumplir con los requisitos necesarios para operar en una WSN. Por lo tanto, cuando lo que prima es el limitante en los recursos de la implementación, *TinyOS* es la mejor elección. Por otra parte, cuando la flexibilidad es el primordial criterio de decisión, por ejemplo, si resulta dispendiosa la actualización del software en todos los nodos de una gran red, *Contiki* es la mejor opción. El lenguaje de programación es otra variable importante a evaluar, *Contiki* posee un simulador propio y existe considerable documentación sobre lenguaje C, puesto que existe una comunidad activa de desarrolladores.

Otro factor de gran relevancia al momento de escoger un sistema operativo es la compatibilidad que pueden tener con diferentes protocolos de comunicación, esto juega un papel fundamental, debido a que son los protocolos los que establecen, controlan y coordinan la transmisión de información entre los dispositivos, ya sea de manera estática o de manera dinámica como lo hace *RPL*. Para entender mejor estos conceptos en la siguiente sección se realiza un breve análisis de estos.

4.3.7. Mecanismos de enrutamiento en las WSN

El enrutamiento, se define como el proceso fundamental en la transferencia de la información desde el origen hasta el destino en una red determinada y fundamentalmente se clasifica en enrutamiento estático y enrutamiento dinámico. El enrutamiento estático se caracteriza por conceder poder total sobre las rutas a través de las cuales se transmitirá la información dado que la configuración de transferencia se realiza manualmente (Tanenbaum & Núñez Ramos, 2003). Las principales ventajas que posee el enrutamiento estático son: realizar copias de seguridad de interfaces o redes dentro de un *router*, se

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

configura de manera sencilla y más seguro. Por otra parte, algunas de sus desventajas se pueden notar cuando el sistema requiera cambios en la red, esto se debe realizar manualmente y no permite una escalabilidad eficaz en topologías de redes grandes.

El enrutamiento dinámico se encarga de mantener actualizada de forma automática la información de los *routers* y nodos de la red. Como las tablas de enrutamiento para la transferencia de información, contribuyendo que el sistema pueda determinar la mejor ruta de envío de paquetes. Por lo tanto, se define como la capacidad que poseen los *routers* para ajustar sus próximos caminos en la recepción y envío de paquetes (Tanenbaum & Núñez Ramos, 2003). La tabla 4-10 contiene un análisis comparativo de los aspectos diferenciadores entre el enrutamiento estático y el dinámico.

Tabla 4-10 Diferencias entre enrutamiento estático y dinámico.

<i>Enrutamiento Estático</i>	<i>Enrutamiento Dinámico</i>
Genera carga administrativa y conlleva mucho tiempo administrar grandes redes. La configuración de enrutamiento en cada enrutador se debe hacer manualmente.	Los <i>routers</i> se enrutan automáticamente con los demás de la red por lo tanto no generan mucha carga administrativa.
Entre <i>routers</i> no se comparten la tabla de enrutamiento.	Entre <i>routers</i> y nodos se comparten la tabla de enrutamientos de sus vecinos.
Ante presencia de fallos en la red no tienen capacidad de reacción.	La red tiene capacidad de reacción ante un fallo.

De acuerdo a la comparación realizada, el enrutamiento a escoger depende directamente de la aplicación y la flexibilidad que queremos tener en la red, dado que el enrutamiento estático no brinda los requisitos que exige una WSN, es el enrutamiento dinámico el que cuenta con las características necesarias para garantizar una comunicación efectiva entre los equipos de la red, gracias a que facilita la inclusión de nuevas motas sin la

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

necesidad de refrescar las tablas de enrutamiento de las motas vecinas facilitando de igual forma la respuesta inmediata cuando alguna mota falla.

Son los mecanismos de enrutamiento, los protocolos de comunicación y los sistemas operativos los encargados de que exista una comunicación entre los equipos de una red. Pero para que esto se pueda llevar a cabo, las herramientas anteriormente citadas se deben integrar en un dispositivo de *hardware* denominado mota, cada mota presenta características diferentes, como, compatibilidad con el sistema operativo, rango de cobertura, capacidad máxima de transmisión, consumo energético, potencia de cálculo, memoria, entre otras, que serán analizadas con mayor detalle a continuación.

4.3.8. Motas utilizadas en WSN

Para la implementación de las WSN se han desarrollado muchas plataformas de *hardware* denominadas motas, conformadas por microprocesadores o microcontroladores, sensores, memoria, *transceptores* de radio, entre otros componentes que son alimentados por una fuente de energía ya sea baterías o paneles solares. Es indispensable tener en cuenta que las características de cada una dependen del fabricante y el nicho de mercado al cual enfocan sus productos.

Con la expansión y el crecimiento del *IoT*, han surgido diferentes tipos de motas, entre las que resaltan la *Mica2* de la empresa *Crossbow*, la *TelosB* de la empresa *Memsic*, La *eKo* también de *Memsic*, la *Waspnote* desarrollada por *Libelium* y la *Z1* creada por la empresa *Zolertia* de la cual se hablará en el capítulo de tecnología utilizada. Independiente del fabricante, todas poseen características similares para su análisis y selección como, frecuencia de operación, consumo energético, distancia máxima de transmisión, capacidad de la memoria, cantidad de puertos para conexión de sensores, entre otros parámetros. Para

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

una mayor comprensión las características de cada mota aquí relacionada se detallan a continuación.

4.3.8.1. Mota *MICA2*

Este tipo de mota, definida ampliamente en (Crossbow, 2016), fue desarrollada inicialmente por la empresa *Crossbow* actualmente *Memsic*. Se presenta como la evolución de la mota *Mica*, y al igual que esta, su enfoque principal son las aplicaciones inalámbricas con redes inalámbricas de bajo consumo energético. Algunas de las mejoras que presenta, respecto a la mota *Mica*, son:

- *Transceptor* de radio multicanal de rango extendido 868/916 MHz, 433 o 315 MHz.
- Sistema operativo *TinyOS* (TOS) de software distribuido v1.0 con pila de red y depuración mejoradas.
- Soporte para reprogramación remota de forma inalámbrica.
- Tarjetas para sensores y adquisición de datos variadas.
- Compatible con *MICA2DOT*.

Esta plataforma trabaja con el dispositivo de procesamiento y radio MPR400CB basado en un microcontrolador *Atmel ATmega 128L* de baja potencia para la ejecución de tareas simultáneas como: la aplicación principal, procesamiento de los sensores, y manejo y control de la pila de red/radio. Además, cuenta con una ranura de conexión que permite integrar las diferentes placas de sensores a procesos de adquisición de datos, utilizando entradas analógicas, interfaces de *E/S* digitales, bus *I2C*, *SPI* y *UART*. La figura 4-30 ilustra un ejemplo de mota *MICA2*.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual



Figura 4-30 Mota MICA2.
Fuente: (Crossbow, 2016)

Algunas aplicaciones o usos de la mota *MICA2* son:

- Sensores de redes inalámbricas.
- Seguridad y vigilancia.
- Monitoreo ambiental.
- Redes inalámbricas a gran escala.
- Plataforma de computación distribuida.

La tabla 4-11 evidencia las características principales de la mota Mica2.

Tabla 4-11 Características principales de la mota Mica2.

Rendimiento del procesador	MPR400Cb
Memoria flash de programa	128K
Medición (Serie) Flash	512K bytes
Configuración EEPROM	4 K bytes
Comunicación serial	UART
Convertor Análogo Digital	10 bit ADC
Otras Interfaces	DIO, I2C, SPI
Consumo de corriente	8 mA
Radio multicanal	
Frecuencia central	868/916 MHz
Número de canales	> 4, > 50
Velocidad de datos	38.4 Kbaud
Potencia de RF	-20 to +5 dBm
Sensibilidad del receptor	-98 dBm
Rango al aire libre	500 ft
Consumo de corriente	27 mA
Electromecánicas	
Batería	2X AA batteries
Potencia externa	2.7 - 3.3 V
Interfaz de usuario	3 LEDs
Tamaño en pulgadas	2.25 x 1.25 x 0.25
Tamaño en milímetros	58 x 32 x 7
Peso (oz)	0.7
Peso (gramos)	18

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual**Conector de expansión**

51 pin

Fuente: (Crossbow, 2016)

4.3.8.2.Mota TELOSB

Perteneciente a la empresa *Memsic*, la mota *TELOSB*, según (MEMESIC, 2016), es una plataforma de código abierto y bajo consumo energético basada en el *TPR2420CA*, cuyo objetivo es ser una herramienta para el desarrollo de experimentos por parte de la comunidad científica. Sus características principales son:

- Antena integrada.
- Compatible con IEEE 802.15.4.
- Trabaja en la banda 2.4 a 2.4835 GHz.
- Interfaz de recolección y programación de datos USB.
- Sensor de temperatura, luz y humedad integrados.
- Funciona con el sistema operativo *TinyOS* 1.1.11 o superior.
- El área de operación interna se mantiene en un intervalo de alcance entre 20 y 30 metros, y su área de operación externa posee un alcance entre 75 y 100 metros.



Figura 4-31 Mota TELOSB.
Fuente: (MEMESIC, 2016)

La tabla 4-12. resumen las principales características de la mota *TelosB*.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

Tabla 4-12 Características de la mota TelosB.

<i>Rendimiento del procesador</i>	TPR2420CA
Rendimiento del procesador	16-bit RISC
Memoria de programa flash	48K bytes
Medición Flash en serie	1024K bytes
RAM	10K bytes
EEPROM de configuración	16K bytes
Comunicaciones Seriales	UART
Convertor analógico digital	12 bit ADC
Convertidor digital analógico	12 bit DAC
Otras interfaces	Digital I/O, I2C, SPI
Consumo de corriente	1.8 mA
	<i>Transceptor de RF</i>
Banda 1 de frecuencia	2400 MHz to 2483.5 MHz
Velocidad de datos del transmisor (TX)	250 kbps
Potencia de RF	-24 dBm to 0 dBm
Sensibilidad de recepción	-90 dBm (min), -94 dBm (typ)
Rechazo de canal adyacente	47 dB
Rango al aire libre	75 m to 100 m
Rango en interiores	20 m to 30 m
Consumo de corriente	23 mA
	<i>Sensores</i>
Rango del sensor de luz visible	320 nm to 730 nm Hamamatsu S1087
Rango del sensor IR visible	320 nm to 1100nm Hamamatsu S1087-01
Rango del Sensor de Humedad	0-100% RH <i>Sensirion</i> SHT11
Resolución	0.03% RH
Exactitud	± 3.5% RH <i>Absolute</i> RH
Rango del sensor de temperatura	-40°C to 123.8°C <i>Sensirion</i> SHT11
Resolución	0.01°C
Exactitud	± 0.5°C
	<i>Electromechanical</i>
Batería	2X AA batteries
Interfaz de usuario	USB
Tamaño (pulgadas)	2.55 x 1.24 x 0.24
Tamaño (Mm)	65 x 31 x 6
Peso (oz)	0.8
Peso (Gramos)	23.

Fuente: (MEMESIC, 2016)

4.3.8.3.Mota Eko outdoor wireless system

El sistema de sensores inalámbricos de *Memsic EKO*, definido en (eKo PRO Series, 2016), es un conjunto de sensores y motas inalámbricas para WSN cuyo fin principal es

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

ofrecer una opción económica y práctica a las empresas para gestionar, automatizar y brindar monitoreo en cualquier entorno aplicado a la industria. Esta mota presenta las siguientes características principales:

- Equipado con alimentación solar y a través de baterías AA recargables con el panel.
- Alcance máximo de 150 a 3200 m dependiendo el despliegue de la red y la configuración de hardware. Frecuencia de operación 2,405 a 2,480 GHz.
- Trabaja con el protocolo XMesh de Memsic facilitando la integración de más nodos a la red a través de *plug-and-play*.
- Enlace de radio DSSS, IEEE 802.15.4.
- Tiempo de vida aproximado de 3 meses sin el panel y 5 años con el panel.
- Visualización de los datos vía *web*.



Figura 4-32 Mota eKo.
Fuente: (eKo PRO Series, 2016)

Sus principales aplicaciones son:

- Investigación Ambiental
- Agricultura de precisión
- Gestión de riego
- Detección de Contaminación

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

- Conservación
- Rejillas de agua inteligentes

Para un análisis más detallado de esta mota puede consultar en (eKo PRO Series, 2016).

4.3.8.4.Mota Libelium Wasmote

La mota *Wasmote* (ver figura 4-33), perteneciente a la empresa *Libelium*, ha sido ampliamente definida en (“Libelium,” 2011). Es una plataforma de hardware que se apoya en diferentes placas integradoras de sensores para la monitorización de entornos variados entre las que destaca la placa de agricultura, capaz de conectar hasta 14 sensores diferentes los cuales son: temperatura del aire, humedad relativa, temperatura del suelo / humedad, humedad en la hoja, presión atmosférica, radiación Solar – PAR, radiación Ultravioleta – UV, diámetro del tronco, diámetro del vástago, diámetro fruta, anemómetro, veleta, pluviómetro y luminosidad. Ver figura 4-36.



Figura 4-33 Mota Libelium de Wasmote.
Fuente: (“Libelium,” 2011)

Libelium Wasmote Idealmente puede transmitir información con un rango de distancia de aproximadamente 7 Km, con línea de vista entre dispositivos a través del protocolo *ZigBee*, lo que le permite abarcar grandes terrenos y almacenar la información en

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

memorias micro SD. Además, logra manejar un bajo consumo energético alrededor de los $0,06 \mu A$ en estado de hibernación. También trabaja con múltiples protocolos de comunicación gracias a sus diferentes placas integradoras de antes para RF. Los protocolos son:

- 802.15.4 / *ZigBee*
- *Sigfox*
- *LoRaWAN* 868 / 900-915 / 433MHz
- *LoRa* 868 / 900/915MHz
- *WiFi*
- 4G
- 3G
- *GPRS + GPS*
- *GPRS*
- *Bluetooth Low Energy (BLE) 4.0*
- *Bluetooth PRO*
- *RFID/NFC*
- *Expansion Radio Board*
- *Waspote Gateway*

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

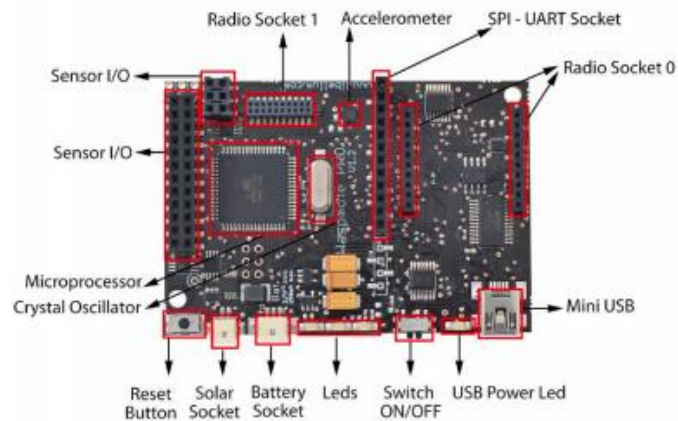


Figura 4-34 Distribución de componentes placa Waspote.
Fuente: (“Libelium,” 2011)

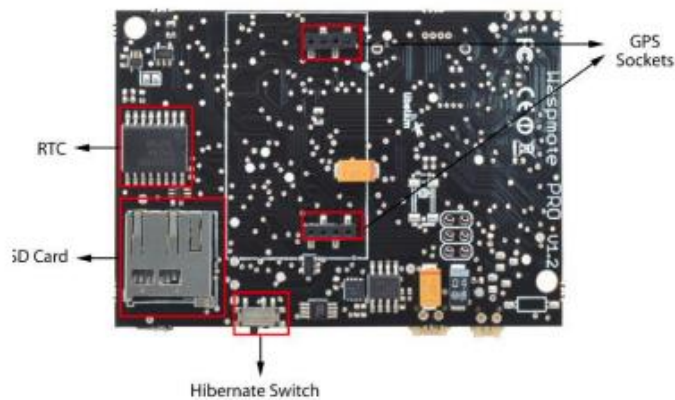


Figura 4-35 Distribución de componentes II placa Waspote.
Fuente: (“Libelium,” 2011)

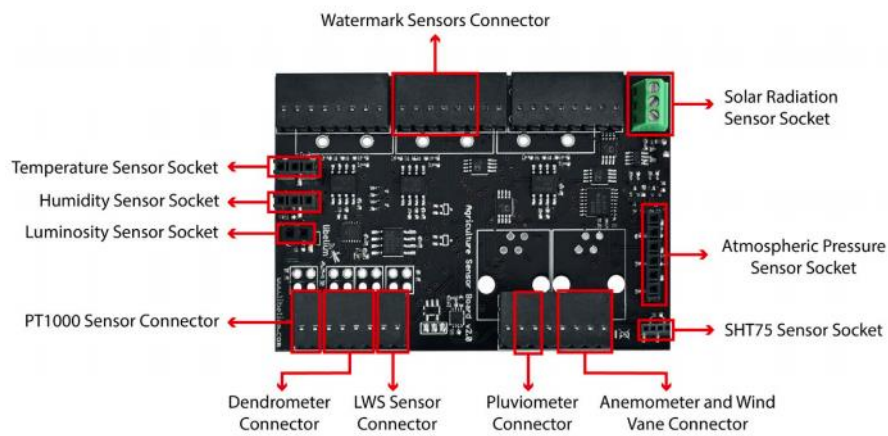


Figura 4-36 Placa integradora de sensores para agricultura.
Fuente: (“Libelium,” 2011)

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

En la tabla 4-13 se encuentran condensadas las características principales de la mota *Waspote* de *Libelium*.

Tabla 4-13 Características de la mota TelosB.

Características Generales	
Microcontrolador	ATmega1281
Frecuencia	14.74 MHz
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
FLASH	128 kB
Tarjeta SD	2 GB
Peso	20 g
Dimensiones	73.5 x 51 x 13 mm
Rango de temperatura	[-10 °C, +65 °C]
Reloj	RTC (32 kHz)
Consumo de potencia	
Encendido	17 mA
Estado de sueño	30 µA
Estado de sueño profundo	33 µA
Hibernando	7 µA
Input / Output	
7 entradas análogas, 8 entradas y salidas digitales	
2 UARTs, 1 I2C, 1 SPI, 1 USB	
Sensores embebidos en la placa	
Acelerómetro: ±2g/±4g/±8g	
Baja potencia: 0.5 / 1 / 2 / 5 / 10 Hz	
Modo Normal: 50 / 100 / 400 / 1000 Hz	
Características Eléctricas	
Voltaje de la batería	3.3-4.2 V
Cargado con USB	5 V - 480 mA
Cargado con panel solar	6-12 V - 330 mA

Fuente: (“Libelium,” 2011)

Después de analizar las características de las motas en estudio, se aprecia que la diferencia entre ellas radica mayormente en que algunas son de código abierto y otras no, algunas tiene soporte para *TinyOS* otras para *Contiki*, o pueden operar con ambos y otras poseen un sistema operativo propio de la empresa, hay unas con poca conexión de sensores o como la *Waspote* cuentan con diferentes placas de conexión similares a los *Shields* de Arduino para poder conectar sensores enfocados a diferentes aplicaciones.

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

A pesar de sus diferencias, el objetivo de cada mota es la captura, transmisión y recepción de los datos para su posterior almacenamiento y con el apoyo de *software* especializados como *Matlab*® poder realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos.

4.3.9. Técnicas para el análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico de los datos favorece en la detección e identificación de patrones ocultos que ayudan a establecer predicciones y obtener conclusiones válidas, con base en esto se pueden tomar decisiones razonables respecto al determinado comportamiento de un fenómeno(Fuenlabrada de la Vega Trucios & Fuenlabrada Velázquez, 2014).

De acuerdo al comportamiento de los datos, las pruebas para realizar un análisis estadístico se dividen en paramétricas, donde se asumen distribuciones subyacentes a los datos bajo supuestos específicos, en caso de que algún supuesto no se cumpla los resultados son erróneos. Y las no paramétricas donde la distribución de los datos no requiere ser conocida dejando a un lado el supuesto de normalidad. Aunque las no paramétricas presentan menos rigidez respecto a las primeras, esta establece supuestos generales (simetría o continuidad de la distribución poblacional) sin importar la procedencia de los datos (Muman Andrés Rojas Dávila, 2003).

Existe una diversidad de pruebas no paramétricas, para efecto de esta investigación se utilizaron el Test de *Kolmogorov-Smirnov* o *K-S* considerado un test de normalidad y el *Test* de *Kruskal-Wallis* el cual se recomienda utilizar cuando las poblaciones de las que se tomaron las muestras son fuertemente asimétricas, a continuación se analizan con mayor profundidad (Soporte Minitab, 2016).

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

4.3.9.1. Test de Kolmogorov-Smirnov o K-S

Considerado una prueba no paramétrica o prueba de hipótesis (afirmación sobre un parámetro de los datos) donde no se requiere que la distribución de los datos siga determinados parámetros (Soporte Minitab, 2016) pues son los datos observados los que la determinan. El test se considera un procedimiento de bondad de ajuste que mide el grado de concordancia existente entre los datos obtenidos en las pruebas de campo (valores observados) y una distribución teórica específica (valores esperados), trabaja con hipótesis nula (H_0) cuya afirmación no se rechaza a menos que los datos obtenidos en las pruebas lo evidencien, dando como resultado la hipótesis alternativa (H_a) considerada en muchos casos opuesta o diferente a la H_0 (Hugo, 2009).

Los errores que se presentan en este tipo de pruebas son errores tipo I, cuando la H_0 es rechazada, pero es verdadera, la probabilidad de cometerlo se denomina nivel de significación, simbolizado α . Errores tipo II, cuando es aceptada y realmente (Hugo, 2009) es falsa, se simboliza como β . Que se rechace o no la H_0 depende del nivel de significación establecido, cuyos valores para el test son 10% que es el menos usado, el 5% uno de los más utilizados y 1%. Por ende, los niveles de confianza son 90%, 95% y 99%, haciendo referencia a la máxima probabilidad de riesgo asignada para cometer un error, según (Clemente, José, & Teresa, 2017) y (Pedrosa et al., 2014).

Las comparaciones se realizan entre los datos teóricos $F_0(x_i)$ y los observados $S_n(x_i)$, estableciéndose las siguientes hipótesis:

$$H_0: F_0 = S_n$$

$$H_a: F_0 \neq S_n$$

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

De esta forma se espera que la diferencia entre los valores de F_o y S_n se encuentren dentro los límites de los errores aleatorios. Luego se toma como valor crítico de comparación la diferencia máxima resultante y a partir de allí se evalúa si existen diferencias estadísticamente significativas (Nivel de significación) entre los datos observados y los teóricos (Clemente et al., 2017), esto se aprecia en la formula (1).

$$D = \max |S_{n(x_i)} - F_{o(x_i)}| \quad (1).$$

Existen diferentes programas informáticos para realizar análisis estadísticos, como *SPSS*, *S-PLUS*, *Minitab*, *Statgraphics* y *Matlab*®, entre otros. En esta investigación se utilizó este último, porque presenta un módulo específico para el trabajo estadístico, denominado *Statistics Toolbox*, que permiten realizar procesos estadísticos descriptivos, modelos probabilísticos, variables aleatorias discretas y continuas, intervalos de confianza y contrastes de hipótesis, modelos de regresión lineal y no lineal, análisis multivariante de datos, control de calidad, diseños de experimentos y otros contenidos de la estadística industrial (Mathworks, 2017c).

Con la herramienta *kstest* de *Matlab*® se realiza el test K-S ($h = \text{kstest}(x)$). Para este proceso los datos se introducen como un arreglo unidimensional, entregando en la salida una decisión de prueba para la H_0 con valor de uno (1) si es rechazada, indicando que los datos ingresados provienen de una distribución normal estándar o cero (0) si es de otro modo, utilizando un nivel de significación del 5% (Mathworks, 2017.). A continuación, se evidencia un fragmento del script utilizado, en lenguaje *Matlab*®, para el análisis estadístico de los datos.

```
vectorprueba = [dato1, dato2, dato3, dato4, dato5];
[h,p] = kstest(vectorprueba);
x = vectorprueba;
```

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

```
clear vectorprueba;
vectorprueba2 = [dato1, dato2, dato3, dato4, dato5];
[h2,p2] = kstest(vectorprueba);
x2 = vectorprueba2;
clear vectorprueba2;
```

4.3.9.2. Test de Kruskal-Wallis

En caso que H_0 sea uno (1), se hace uso del test de *Kruskal-Wallis* ($p =$ `kruskalwallis(x)`) perteneciente a las pruebas no paramétricas. Permite identificar si los datos o conjunto de datos utilizados proceden de una misma población o si al menos uno de ellos tiene procedencia distinta. Según (McKight, Najab, McKight, & Najab, 2010) y (Soporte Minitab, 2016) en este caso se comparan los datos utilizando la mediana de cada uno de ellos, en lugar de las medias. A partir de lo anterior, se formulan las siguientes hipótesis:

H_0 = Todas las medianas de las poblaciones son iguales (muestras aleatorias, extraídas de las mismas o distribuciones poblacionales idénticas).

H_a = Todas las medianas de las poblaciones no son iguales.

Por otra parte, si el resultado de H_0 para el test K-S es cero (0), se implementa la herramienta *ANOVA (ANalysis Of VAriance)* análisis de la varianza, cuya H_0 indica que las medias de K poblaciones son iguales y la H_a . Menciona que al menos una de las poblaciones es diferente de las demás (Soporte Minitab, 2016). Abajo se observa el tratamiento brindado con *Kruskal-Wallis* o Anova de acuerdo al resultado que arroje el test de *Kolmogorov-Smirnov*.

```
A = [x; x2];
A = A';
if h == 1
    if h2 == 1
        [pk,tbl,stats] = kruskalwallis(A);
        print('matlab_timeInterval','-dpng');
    end
```

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

```
else
    [pk,tbl,stats] = anova(A);
    print('matlab_timeInterval','-dpng'); hold on;
end
```

Estos test nos permiten identificar si al menos unos de los grupos de datos no guardan relación con el resto. Se aclara que para aplicar cada uno de estos test existen diversas hipótesis nulas y condiciones que los datos deben cumplir para que el test sea fiable, por tanto, no se pueden aplicar todos los test sin verificar si se cumplen las H_0 , en caso de quebrantarse los resultados posteriores se invalidan, esta es la causa principal de errores en los análisis estadísticos.

Para aplicar los test *K-S*, *Kruskal-Wallis* y *Anova* se organizaron e introdujeron en Matlab® los datos de las pruebas con sus homónimos en forma de matrices, los resultados se representaron en diagramas de caja y bigotes o *Box plot*, útiles para visualizar la variabilidad de datos y compararlos con otros grupos. Idealmente tienen como punto de referencia la mediana ubicada en la mitad del rectángulo para proveer una visión general de la simetría que tengan, de no ser así se puede identificar que son asimétricos. Por otra parte, los límites superiores e inferiores del rectángulo indican los percentiles 75 y 25 que a su vez son los cuartiles Q3 y Q1, la diferencia entre ellos representa el Rango Intercuartílico o Intercuartil (IQR) considerado como una estimación estadística de la dispersión de una distribución de datos, mientras que la mediana representa el percentil 50 y cuartil Q2 (Zweng, Green, Kilpatrick, Pollak, & Suydam, 1983). El percentil es una medida de posición usada en estadística que indica el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de datos en un grupo de datos analizados. Los *Box plot* también facilitan la identificación de valores máximos, mínimos y atípicos (valores fuera de

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

los rangos de los valores máximos o mínimos), según (Mathworks, 2017a), (Gries, 2009) y (Baayen, 2008).

A los diagramas se le adicionaron muescas que marcan el intervalo de confianza del 95% para las medianas, indicando que es una estimación de un intervalo en el que la mediana estará en el 95% de las muestras. Cuando los tamaños de los datos son similares, las muescas permiten afirmar si de forma aproximada las medianas son o no diferentes. Si no se solapan entre si las medianas son significativamente diferentes en un 5%, pero si existe solapamiento no excluye una diferencia significativa (Chambers, 1983).

Para el caso puntual de esta investigación, los datos a analizar serán los obtenidos a través de métricas que ayudan a evaluar el rendimiento de la red cuando se establece un radio enlace entre motas. En la siguiente sección se aprecian las diferentes métricas utilizadas para el estudio de las WSN.

4.3.10. Métricas para evaluar el rendimiento de la red

Las métricas ayudan a determinar el desempeño de una red evaluando diferentes aspectos de la misma como, la capacidad del canal, la dispersión del retardo o *Jitter*, el retardo de los paquetes, el *RTD Round-Trip Delay Time*, *Throughput* y convergencia de la red. Esto contribuye a identificar donde la red está presentando mayores inconvenientes al momento de establecerse un radio enlace, por consiguiente, a continuación, se profundiza un poco más en las métricas relacionada anteriormente.

La capacidad del canal es una métrica que se encuentra asociada a la cantidad de información que un canal puede transmitir ante presencia de ruido y utilizando un ancho de banda establecido. En el protocolo *6LoWPAN* este parámetro vienen definido por el *IEEE*

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

802.15.4 que establece las características del medio y la velocidad máxima de transmisión definida en *250Kbps*.

La dispersión del retardo o *Jitter* es una métrica que hace referencia a las fluctuaciones presentes en el envío de información. Aquí el análisis es temporal debido a que se evalúan los tiempos de envío y recepción cuando un paquete llega al receptor antes o después del tiempo real en el que debe llegar, viéndose reflejado en errores de interpretación (Li, 2007). Muchas veces estos errores son asociados a retardos en la cola de transmisión dentro de la red, aspecto que se puede corregir con la implementación de un “*buffer jitter*” el cual tiene la particularidad de introducir un retardo general para regular los tiempos de envío y recepción de los paquetes.

El retardo de paquetes es una métrica que hace referencia a los tiempos de retardos que sufre un paquete cuando llega a su destino. Por consiguiente, se puede analizar unidireccionalmente o bidireccionalmente. Estos retardos en muchas ocasiones son ocasionados por características propias de los equipos, en la parte del transmisor puede afectar el tiempo que éste tarda en procesar la información, mientras que en la etapa del receptor puede influir en el ensamblado de los paquetes (CISCO, 2008).

Otros tipos de retardos a tener en cuenta son: (1) el denominado retardo de buffer, (2) retardo en el receptor y (3) retardo de propagación. El primero está representado por el tiempo utilizado para analizar información procesada que se encuentra almacenada en un sector de la memoria interna del dispositivo de manera temporal. El segundo viene dado por el tiempo utilizado por el receptor para recuperar un mensaje original y el tercero, se asocia al retardo producido por el tráfico de información en la red y está dado por el tamaño

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

de la información a transmitir (**B**), sobre la capacidad de la red en bits (**R**), **B/R** expresado en segundos según (España Boquera, 2003) y (Piñeres-Espitia, 2015).

El *Round-Trip Delay Time (RTD)* o *Round-Trip Time (RTT)*, es conocido como el tiempo de ida y vuelta, hace referencia al tiempo que demora un paquete en ir desde el emisor hasta el receptor y que éste envíe un acuse de recibido (*ACK*) al emisor. De esta forma se pueden evaluar aspectos de una red como, confiabilidad en la entrega de paquetes y retardos dentro de una red determinada según (Docmac, Silva, & González, 2013) y (Karn & Partridge, 1991). Este tiempo se puede determinar a través del comando *ping6* y el uso de la herramienta *Wireshark* para el monitoreo, envío y recepción de los paquetes.

El *Throughput* es la tasa promedio de paquetes efectivos enviados y recibidos en un canal de comunicación dentro de una red, se puede expresar en bps (bits por segundos), *Bps* (Bytes por segundos) o Pps (Paquetes por segundos) (Bai & Zhang, 2012). Para el protocolo *6LoWPAN*, utilizado en el diseño de la red propuesta, la tasa máxima de transferencia viene definida por el protocolo *IEEE 802.15.4* en *250 Kbps* (Olsson, 2014).

La convergencia de la red es el evento que ocurre dentro de la red, cuando el flujo de información reencaminada se fusiona de nuevo a un punto en la ruta sin errores, se puede decir que es la forma en que las redes se recuperan de los problemas y los cambios que sufre la red. Esto se cumple cuando las tablas de enrutamiento de los enrutadores y dispositivos, se encuentran en uniformidad con información completa y precisa de la red. El tiempo que demoran los dispositivos en actualizar sus tablas de enrutamiento y seleccionar las rutas de envío es conocido como el tiempo de convergencia de la red, la mayoría de las redes requieren de tiempos que pueden ir desde pocos milisegundos hasta muchos segundos para que haya convergido y sea totalmente operativa según (IXIA, 2014). Debido a que el

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

tiempo crece logarítmicamente con el número de nodos en la red (Clausen & Herberg, 2010). Este tiempo es el necesario para construir la estructura *DODAG* de *RPL* (Koubaa et al., 2011) y se mide a partir del momento en que el nodo raíz envía el primer mensaje de control y termina cuando ya las tablas de enrutamiento se encuentran actualizadas (Nguyen Thanh Long, De Caro, Colitti, Touhafi, & Steenhaut, 2012).

Aunque existen considerables avances en investigación dedicados al protocolo *RPL*, la convergencia de *RPL* no se ha investigado al detalle. En (H. Kermajani & Gomez, 2014) los autores analizan la influencia de la constante de redundancia k y el intervalo mínimo I_{min} como parámetros cruciales que influyen en la convergencia de *RPL* en redes IEEE 802.15.4. Que son dos de los tres importantes parámetros del algoritmo de configuración *Trickle*. Encargado de programar y transmitir mensajes *DIO* en una red *RPL* con el objetivo de reducir al mínimo la cantidad de *DIO* transmitidos al tiempo que garantiza un bajo tiempo de convergencia de la red tal como se indica en (Levis & Clausen, 2011) y (Clausen, Herberg, & Philipp, 2011).

En el algoritmo de configuración *Trickle* (encargado de gestionar el tráfico entrante y saliente haciendo uso eficiente de la conexión a red), la constante de redundancia k es un número natural entero mayor que cero, que limita el número de los mensajes enviados por intervalo en un área de cobertura, de acuerdo con (Levis & Clausen, 2011) los valores típicos de k son 1 – 5 para lograr un equilibrio entre la redundancia y el bajo coste de la red, mientras que (Brandt et al., 2012) sugiere utilizar 10, aunque no hay claridad del porque usar este valor. El intervalo mínimo I_{min} es un valor determinado por $I_{min} = 2^{DIOIntervalMin}$ donde el *DIOIntervalMin* es anunciado por el *DODAG ROOT* y representa el intervalo más pequeño entre dos mensajes *DIO* (Mohamed & Mohamed, 2015). Por defecto, este se

Capítulo No 4. Marco Teórico —Conceptual

encuentra configurado en tres (3), equivalente a 8 ms, como se menciona en (Brandt et al., 2012). Bastante bajo cuando se utilizan intervalos de despertar superiores a los 8 ms, por tal motivo *Contiki RPL* establece el *DIOIntervalMin* en 12 para un total de 4.096 segundos.

La configuración del protocolo RPL se encuentra ligada a diferentes códigos fuentes, presentes en la ruta *./Contiki/core/net/RPL*, tales como: *RPL.h*; *RPL-conf.h*; *RPL-dag.c*; *RPL-dag-root.c*; *RPL-of0.c* y *RPL.c*; *RPL.h*, indispensables para el correcto funcionamiento del mismo. Para profundizar en los detalles más importantes de las funciones de estos archivos se pueden consultar (ANRG, 2014).

En el archivo *RPL-conf.h* se encuentran configurados los parámetros principales del protocolo.

```
//Configuración de la constante de redundancia k.
#ifdef RPL_CONF_DIO_REDUNDANCY
#define RPL_DIO_REDUNDANCY          RPL_CONF_DIO_REDUNDANCY
#else
#define RPL_DIO_REDUNDANCY          10
#endif

//Configuración del Intervalo mínimo Imin.
#ifdef RPL_CONF_DIO_INTERVAL_MIN
#define RPL_DIO_INTERVAL_MIN        RPL_CONF_DIO_INTERVAL_MIN
#else
#define RPL_DIO_INTERVAL_MIN        12
#endif
```

Dependiendo las características de las *WSN* se pueden implementar varias métricas de las relacionadas anteriormente para poder determinar la calidad de un enlace de red. Además, es indispensable tener claro la aplicación y el objetivo principal de la red para poder realizar un correcto análisis de sus prestaciones de comunicación. En relación a esto se presentan diferentes aplicaciones de las *WSN* en el sector del agro.

Capítulo No 5. Las WSN en la agricultura de precisión

5. LAS WSN EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

A continuación, se presenta una breve descripción de trabajos similares al expuesto en esta investigación, que relacionan la WSN con la agricultura de precisión.

En (Bencini et al., 2012) se describe el diseño de un sistema compuesto por una WSN auto-organizada con capacidad de detección, transmisión *GPRS*, conexión a servidor remoto a través de *TCP/IP* y una aplicación Web que permite la gestión de la información y brinda opciones de control al agricultor sobre las variables medidas: temperatura del aire, humedad relativa y humedad del suelo, entre otras; y dado que la transmisión de datos se relaciona con el consumo energético, proponen un protocolo de comunicación denominado *D-STAR* por sus siglas de *Directive Synchronous Transmission Asynchronous Reception*, que integra los beneficios de *WiseMAC* (El-Hoiydi & Decotignie, 2004) y de *SMAC* (Wei Ye, Heidemann, & Estrin, 2002). También, consiguen ahorro energético a través de la sincronización espacio-tiempo, donde cada nodo envía información periódicamente a sus vecinos y luego vuelve a un estado de escucha (sincronización de tiempo), por otra parte, el nodo receptor identifica la posición angular relativa del nodo emisor durante la recepción de paquetes (sincronización espacio).

En (Matese, Gennaro, Zaldei, Genesio, & Vaccari, 2009) se presenta un desarrollo enfocado a la viticultura de precisión, que busca mejorar la calidad de los productos. El sistema *NAV* (*Network Avanzato per il Vigneto – Advanced Vineyard Network*) implementado en un viñedo, requiere de una unidad maestra y nodos inalámbricos desplegados en toda la viña para el monitoreo de la temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, la precipitación, la presión atmosférica, la humedad del aire y la

Capítulo No 5. Las WSN en la agricultura de precisión

radiación solar global. Los datos son transmitidos al servidor central remoto por medio de *GSM/GPRS*. En este sentido, están las investigaciones llevadas a cabo en la Universidad de Florencia en Italia que dieron origen a la *Spin-Off NetSens* (Bencini et al., 2012), aquí los autores realizaron pruebas en diferentes cultivos de uva en Italia y Francia desde el año 2005 con una red de 50 nodos y 198 sensores ejecutando el protocolo *D-STAR MAC* que contribuyó a disminuir el consumo energético, convirtiéndose en una fuente de información para el estudio del crecimiento de la uva.

En (Nandurkar, Thool, & Thool, 2014), se presenta un sistema automatizado de riego por goteo y de bajo costo basado en *WSN* para optimizar el consumo del agua. Se monitoriza la temperatura y humedad del suelo, para detectar el lugar, momento y cantidad de agua adecuada para el cultivo. Esta tecnología se está brindando a agricultores de escasos recursos y disminuye la intervención humana en el proceso de irrigación. Así mismo, en la India, que es el principal exportador de mango del mercado asiático, se desarrolló un modelo de *WSN* para monitorizar y controlar la humedad del suelo mejorando la calidad y optimizando el uso del agua en este cultivo (Kodali & Rawat, 2013b).

Para el caso de los invernaderos, está la investigación de (J. Wang & Liu, 2012), que usan sistemas combinados de *WSN* y web para el monitoreo de la temperatura, humedad, iluminación y dióxido de carbono, almacenando los datos en un servidor al que se puede acceder remotamente. El sistema se encuentra dividido en tres niveles, el nivel de sensores de aplicación conformada por los nodos sensores y el *Gateway*, distribuidos con capacidad de auto-organización al interior de los invernaderos. El nivel de gestión distribuida, donde se obtiene y procesan los datos, y el nivel de servicio web que transfiere los datos a Internet para la disponibilidad de los usuarios.

Capítulo No 5. Las WSN en la agricultura de precisión

En Murcia (España), se implementó una *WSN* en un cultivo de col como aplicación a la horticultura de precisión. El sistema monitorea en tiempo real permitió la recolección de las siguientes variables: temperatura, humedad volumétrica y salinidad del suelo. El diseño de la solución permitió un bajo consumo energético, su infraestructura era simple y confiable para la obtención de datos (Riquelme et al., 2009).

En plantaciones de algodón, la humedad del suelo es un factor importante que influye en la calidad y cantidad del cultivo. En la investigación de (R. Zhang, Chen, Xu, & Wang, 2009) en la China (potencia mundial en la producción de este cultivo) se propone un sistema de supervisión basado en nodos sensores equipados con módulos de comunicación RF para detectar la humedad del suelo y enviar la información al *Gateway-GPRS* encargado de procesar los datos, para luego volver a transmitirlos al centro de gestión a través de la red *GPRS*. El sensor seleccionado para el sistema es el *ECH2O* con consumo de potencia muy bajo y alta resolución facilitando las mediciones durante largos periodos de tiempo. Por último, los investigadores crearon un software de monitoreo que facilita el análisis estadístico de los datos obtenidos.

También está el sistema de monitorización para cultivo de patatas denominado *PotatoSense*, que nace de las investigaciones de (Khedo, Hosseney, & Toonah, 2014). El sistema se implementó en la Isla Mauricio ubicada en el Océano Índico al este de Madagascar y se encarga de medir temperatura, humedad del suelo y pH a través de nodos sensores. Hace un análisis de los datos e indica al agricultor los sectores que necesitan riego o fertilizantes, consiguiendo un ahorro de los insumos, mayor cuidado del medio ambiente, aumento en la cantidad y calidad de los cultivos. Otras investigaciones como las de (Shinghal, Noor, Srivastava, & Singh, 2010) proponen un sistema de riego para cultivos de

Capítulo No 5. Las WSN en la agricultura de precisión

patatas basado en WSN, a partir de un análisis de la cantidad de riego óptima para el correcto desarrollo del tubérculo. Por su lado, en Egipto, para el mismo tipo de cultivo se han desarrollado aplicaciones de agricultura de precisión con WSN (El-kader & El-basioni, 2013).

En (Balamurali & Kathiravan, 2015) se analizan varios protocolos de enrutamiento como AOMDV (*Ad-hoc On Demand Multipath Distance Vector Routing*), AODV (*Ad-hoc On Demand Distance Vector Routing*), DSR (*Dynamic Source Routing*) e *Integrated MAC and Routing Protocol (IMR)* Para la agricultura de precisión utilizando WSN. Concluyendo que IMR es el más indicado para redes con multi-salto extendiendo el tiempo de vida útil de la red, definiendo tiempo de vida como el momento en el que falla el primer nodo.

Una solución sencilla y económica para monitorizar y controlar la temperatura y humedad del suelo a través de la agricultura de precisión se aprecia en (Santoshkumar & Udaykumar R.Y, 2015), donde se plantea un nodo basado en software abierto y prototipo electrónico con la plataforma Arduino, el protocolo *ZigBee*, el sensor de temperatura LM35 y el de humedad del suelo LM358.

El sistema de monitoreo y control desarrollado por (Mat, Mohd Kassim, Harun, & Mat Yusoff, 2016) *Greenhouse Management System (GHMS)* está enfocado en la medición y control de la temperatura, humedad del aire y humedad del suelo a través de sensores *Wireless Moisture Sensor Network WMSN* y actuadores tales como la bomba de agua para el riego, el ventilador para la circulación del aire y la niebla para agregar agua en el aire e incrementar la humedad.

Respecto al cultivo del café, Colombia es el tercer productor de café a nivel mundial, después de Brasil y Vietnam. (Urbano-molano & Aparicio, 2012) desarrollaron

Capítulo No 5. Las WSN en la agricultura de precisión

una aplicación con *WSN* cuyo objetivo principal es mejorar la calidad en el grano de café y disminuir las pérdidas ocasionadas por los cambios climáticos, todo ello a partir del análisis de los datos obtenidos en la etapa del cuidado y cosecha del grano.

Aunque no es relacionado al tema de la agricultura de precisión, se encontró en (Estévez, Glösekötter, & González, 2016), la propuesta de un algoritmo de enrutamiento basado en agrupación jerárquica asignada dinámicamente *DARAL* (*Dynamic and Adaptive Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks*). Este algoritmo es sometido a comparación con otros similares como *AODV* (*Ad-Hoc On demand Distance Vector*) y *RPL* bajo distintos escenarios de pruebas (baja, media y alta densidad de nodos) para maximizar la cobertura de la red y minimizar el tiempo de convergencia. Para ello se apoyan en simulaciones realizadas con *OMNeT++*, y análisis estadístico de los resultados a través de los test *Kolmogorov-Smirnov* y *Kruskal-Wallis*. Esta investigación demostró que *Daral* reduce el tiempo de convergencia en los escenarios de pequeñas y medianas densidades, como también lo hace en escenarios grandes con densidades de nodos bajas y medias.

Después de revisar la literatura en base de datos, no se encontraron trabajos de artículos científicos que relacionen a la *WSN* y su aplicación en la agricultura de precisión para cultivos de yuca. Siendo los trabajos más cercanos los relacionados a las patatas. Esto significa que es una importante oportunidad para estudiar el comportamiento de las principales variables agronómicas que influyen sobre el tubérculo, con la ventaja que solo las *WSN* pueden brindar para la obtención de registros históricos de datos para su posterior uso en universidades, gremios de agricultores, asociaciones del campo, entre otros.

Capítulo No 6. Materiales

6. MATERIALES

En esta etapa se realiza una descripción de los equipos utilizados para el proyecto, como son, el ordenador portátil usado para la adquisición de los datos, el sistema operativo para motas *Contiki*, la mota *ZI* de la empresa *Zolertia* para el desarrollo del diseño propuesto y los sensores utilizados (*SHT11* y *TMP102*). La versión de *Contiki* utilizada es la 2.7, ejecutada en un computador marca *DELL* Inspiron 3437 *Core* i5-4200 de 64bits, con frecuencia de reloj de 1,60 GHz, 6GB de memoria *RAM* y sistema operativo *Ubuntu* 14.04 *LTS*.

Contiki suministra carpetas con las librerías necesarias para el manejo de los diferentes módulos y motas con las que es compatible, al igual que carpetas de ejemplos creados por diferentes desarrolladores entre los que destacan Adam Dunkels y Antonio Liñan. Estos ejemplos sirvieron de base para la configuración de los equipos y desarrollo de las pruebas, cabe aclarar que en los ejemplos se realizaron algunas modificaciones requeridos para las implementaciones, pero la autoría de los códigos es propia de sus desarrolladores, y se encuentran relacionados en los encabezados iniciales de cada código en la carpeta de ejemplos.

6.1 LA MOTA *ZI*

Esta plataforma perteneciente a la empresa *Zolertia* (ver figura 6-1), está enfocada en el desarrollo de redes de sensores inalámbricas con la finalidad de mejorar el rendimiento y capacidad de expansión en este tipo de redes, para mayor información se puede consultar en (Zolertia, 2010). Puede operar con los sistemas operativos *Contiki*, *TinyOS*, *OpenWSN* y *RIOT*, además cuenta con soporte para *6LoWPan* en su pila de red, el

Capítulo No 6. Materiales

protocolo *RPL* y *CoAP*. Se caracteriza por ser un módulo de baja potencia y flexibilidad de *hardware*, siendo el microcontrolador *MSP430F2617* de *Texas Instruments* el dispositivo central de procesamiento, por lo que puede ser compatible con motas que presenten la misma arquitectura (Colina et al., 2016).

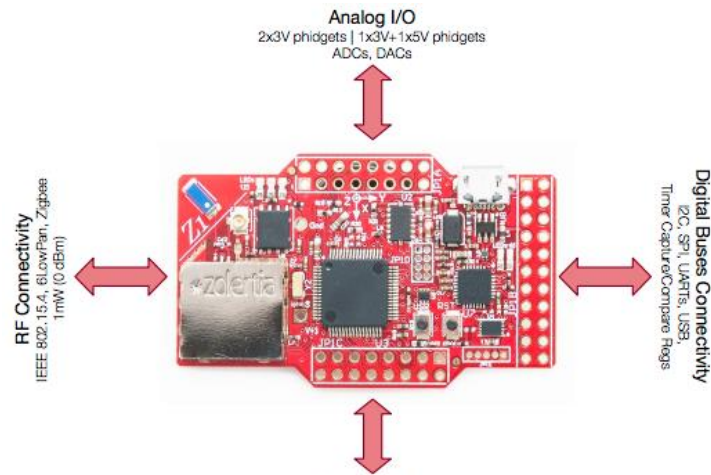


Figura 6-1 Mota Z1 de Zolertia.
Fuente: (Zolertia, 2010)

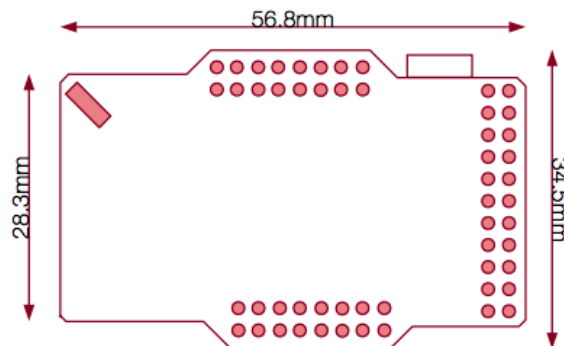


Figure 1— Mechanical Specifications

Figura 6-2 Dimensiones de la Mota Z1.
Fuente: (Zolertia, 2010)

Las principales características a nivel de hardware de la mota *Z1* según (Zolertia, 2010) son:

- Velocidad del reloj del microprocesador es de 16 *MHz*.

Capítulo No 6. Materiales

- Posee 8KB de memoria *RAM*.
- Arquitectura RISC.
- Memoria flash de 92 KB.
- Capacidad máxima de transmisión de 250 *Kbps*, con una distancia máxima de 150 m.
- Es compatible con sensores analógicos y digitales.
- Contiene un transceptor de *RF CC2420*.
- Compatible con *IEEE 802.15.4*.
- No requiere hardware externo para poder ser programado.
- Conector USB para programación y alimentación.
- Acelerómetro *ADXL345* de tres ejes.
- Tiene 52 pines para realizar expansión a través de conectores *phidgets*.
- Plataforma ideal para el desarrollo de prototipado.
- Puede ser alimentada por 2 baterías AA o a través de *USB*.

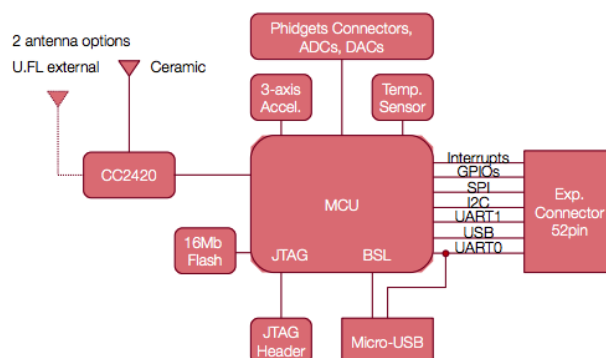


Figura 6-3 Diagrama de bloques de la mota Z1.
Fuente: (Zolertia, 2010)

Capítulo No 6. Materiales

Tabla 6-1 Consumo energético aproximado de la mota Z1 para MSP430f2617.

IC	Voltaje de operación	Consumo	Estados
MSP430f2617	1,8V a 3,6V	0,1 μ A	Modo apagado
		0.5 μ A	Modo de espera
		0.5mA	Modo activo 1MHz
		<10 mA	Modo activo 16MHz

Fuente: (Zolertia, 2010)

Tabla 6-2 Consumo energético aproximado del CC2420.

IC	Rango de operación	Consumo	Estados
CC2420	2.1V a 3.6V	<1 μ A	Modo apagado
		20 μ A	Corriente de corte
		426 μ A	Modo inactivo
		18.8mA	Modo RX
		17.4mA	Modo TX

Fuente: (Zolertia, 2010)

Tabla 6-3 Consumo energético aproximado del acelerómetro ADXL345.

IC	Rango de operación	Consumo	Estados
ADXL345	1.8V a 3.6V	0,1 μ A	Estable
		40 μ A a 145 μ A	Modo activo

Fuente: (Zolertia, 2010)

Tabla 6-4 Consumo energético aproximado de la memoria flash externa M25P16.

IC	Rango de operación	Consumo	Estados
M25P16	2.7V a 3.6V	1 μ A	Gran caída de voltaje
		4mA a 15mA	Modo activo

Fuente: (Zolertia, 2010)

Tabla 6-5 Consumo energético aproximado del sensor de temperatura TMP102.

IC	Rango de operación	Consumo	Estados
TMP102	1.4V a 3.6V	1 μ A	Modo apagado
		15 μ A	Modo activo

Fuente: (Zolertia, 2010)

Capítulo No 6. Materiales

Tabla 6-6 Valores nominales máximos absolutos del módulo WSN Z1.

Descripción	Rango
Tensión de alimentación Vcc	-0.3V hasta +3.6V
Voltaje en cualquier pin digital	-0.3 hasta Vcc+0.3V
Max. Potencia de entrada RF	10dBm
Temperatura de almacenamiento	-40°C hasta +105°C
Temperatura de funcionamiento	-40°C hasta +85°C

Fuente: (Zolertia, 2010)

Las principales aplicaciones de la mota Z1 son:

- El Internet de todas las cosas.
- El monitoreo ambiental, de sistemas de vigilancia, seguridad; agrícola y de la atención médica con carácter personal.
- Detectores de emergencia.
- Medición de energía.

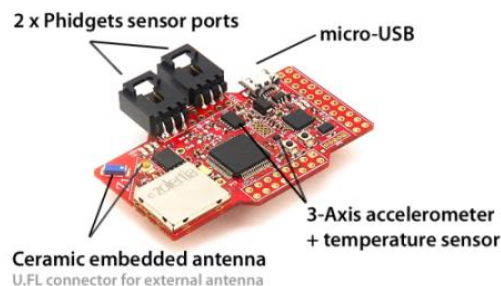


Figura 6-4 Mota Z1 distribución de componentes.

Fuente: (Colina et al., 2016)

Uno de los estudios que se realizaron respecto a la mota Z1 fue la implementación del protocolo *DPCF* (*Distributed Point Coordination Function*) en una red cuyo objetivo principal era evaluar el rendimiento del protocolo en términos de bits por segundo y la capacidad de consumo energético donde se establece una relación de *joules* por bit

Capítulo No 6. Materiales

transmitido, con el fin de valorar su posible uso en redes M2M como alternativa a la capa *MAC* definida en el estándar *IEEE* 802.15.4. Como resultado se obtuvo que el tiempo de operación de las motas aumenta un 80% con el protocolo “*DPCF* con *duty-cycle*” respecto al estándar *IEEE* 802.15.4 (José Manuel Linares Arenas, 2014).

Para el diseño del prototipo de *WSN* aquí planteado, se ha escogido el protocolo *RPL* por las ventajas y características anteriormente analizadas al igual que *Contiki*, como sistema operativo para la configuración y control de la red. Aclarado esto, se puede observar que, aunque hay varias plataformas de hardware para el establecimiento de una *WSN* con prestaciones bastante buenas, como es el caso de la *eKo*, por su sistema integrado de energía y fácil instalación *plug-and-play* y la *Wasp mote* con su diversidad de placas integradoras de sensores. La que combina el uso de *RPL* y *Contiki* es la mota *Z1*. Esta y sus otras características como el bajo consumo energético y su integración con el protocolo *CoAP* permite pensar en una posible aplicación donde se deba implementar dicho protocolo evitando la necesidad de tener que adquirir nuevos dispositivos a largo plazo. Además, ofrece conexión de sensores digitales y analógicos, con una variedad de librerías disponibles para el desarrollo de múltiples aplicaciones, a continuación, se realizará un análisis de los sensores utilizados para el desarrollo de este proyecto.

6.2 SENSORES

Los sensores o transductores son dispositivos que capturan las magnitudes físicas del medio ambiente para poder convirtiéndolas en señales eléctricas medibles. Son precisamente los sensores los que interactúan directamente con el entorno donde se desea implementar una *WSN*. En este orden de idea se presenta un breve análisis de los sensores

Capítulo No 6. Materiales

escogidos el sensor digital *SHT11* para la medición de temperatura y humedad del suelo y el sensor *TMP102* para la medición de temperatura ambiente.

6.2.1. Sensor SHT11

Para la medición de temperatura y humedad del suelo se escogió este sensor, desarrollado por la empresa *Sensirion*. Con él se pueden realizar mediciones de temperatura y humedad del suelo con precisión bastante confiable, además la lectura e interpretación de la información se facilita gracias a su salida digital con alta inmunidad al ruido. Adecuado para uso profesional e industrial, cabe resaltar que fácilmente se puede utilizar en *Contiki* ya que existen librerías desarrolladas y disponibles para su implementación (SENSIRION, 2003). En la figura 6-5 se observa el sensor a la intemperie mientras que en la figura 6-6 se aprecia con una cubierta metálica para las mediciones en suelo.



Figura 6-5 Sensor SHT11.



Figura 6-6 Sensor SHT11 con cubierta metálica contra el óxido.

Fuente: (SENSIRION, 2003)

Tabla 6-7 Características del sensor SHT11.

Alimentación:	3 - 5V DC
Temperatura:	-40°C a 123,8°C
Precisión temperatura:	0,4°C
Humedad:	0 a 100%
Precisión humedad:	3%
Consumo energético:	30μW normalmente

Fuente: (SENSIRION, 2003)

Capítulo No 6. Materiales

6.2.2. Sensor TMP102

Desarrollado por la empresa Texas Instruments, puede realizar lecturas de la temperatura con resolución de 0.0625°C . Ideal para medición extendida de temperatura en aplicaciones industriales, ambientales y de comunicación, entre otras. Tiene un rango de medida de -40°C a $+125^{\circ}\text{C}$ y opera con un voltaje de alimentación de 1.4 V a 3.6 V DC (Texas Instruments, 2008). Este sensor se encuentra empotrado en el circuito de la mota Z1, lo cual podría afectar sus mediciones debido a la influencia de la temperatura de la placa, que se concentra en el case de la mota.

Tabla 6-8 Características del sensor TMP102.

Alimentación:	1,4 a 3,6V
Temperatura:	-40°C a 125°C
Precisión temperatura:	0.0625°C
Consumo energético:	10- μA Activo (máx.) 1- μA Apagado (máx.)
Resolución:	12 bits
Interfaz:	I2C

Fuente: (Texas Instruments, 2008)

A través de estos sensores se logra capturar datos del entorno en estudio, en este caso los cultivos de yuca. Contribuyendo a que el agricultor pueda tomar decisiones basadas en parámetros reales y no basarse en pruebas de ensayo y error. Además, con la suficiente información almacenada y el uso de técnicas para análisis de datos como *BigData* se pueden detectar parámetros o características que a simple vista no son fáciles de detectar. El almacenamiento de la información se logra a través del uso de servidores tema principal de la siguiente sección.

Capítulo No 6. Materiales

6.3 SERVIDORES EMBEBIDOS PARA WSN

Un servidor es un dispositivo con capacidad de cómputo capaz de almacenar información proveniente de diversas fuentes y suministrarla en el momento que sea necesario. Aunque hay diversidad de equipos con capacidad para actuar como servidor en una red, a continuación, sólo se relacionan dos, por ser los más reconocidos en el ámbito tecnológico, debido a su rendimiento. El *Sheevaplug*, de la empresa Marvell (ver figuras 6-7 y 6-8), y el *Raspberry PI* (ver figura 6-9), ambos forman parte de los hoy denominados miniordenadores embebidos (Marvell, 2016).

6.3.1. Sheevaplug

El *Sheevaplug* con un tamaño similar al de un tomacorriente, tiene la capacidad de ejecutar ciertos servicios de red que en muchas ocasiones requieren de un ordenador dedicado a tal fin. Cuenta con un procesador basado en la arquitectura *ARM* llamado *Marvell Kirkwood 88F6281*, que opera a una frecuencia de reloj de *1.2GHz* y cuenta con una memoria RAM de *512MB* además de una memoria flash de la misma capacidad. Su interacción con el entorno se da gracias a un puerto *USB 2.0* utilizado frecuentemente para conexión de algún periférico, posee un puerto para conexión a red de *1Gbps Ethernet*, un lector de tarjetas *SD* y un puerto mini *USB*.

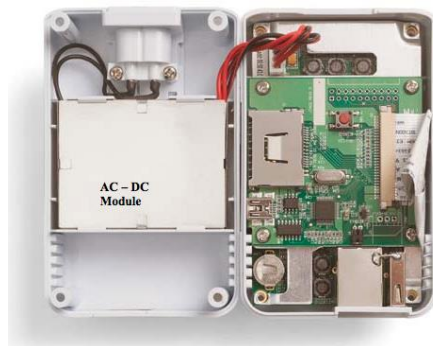


Figura 6-7 Dispositivo Sheevaplug.

Capítulo No 6. Materiales

Fuente: (Marvell, 2016)



Figura 6-8 Dispositivo Sheevaplug cerrado.

Fuente: (Marvell, 2016)

En cuanto al sistema operativo, trae instalado de fábrica una versión de Ubuntu 9.04 para *ARM*, pero tiene compatibilidad con varias distribuciones de *GNU/Linux* entre los que destacan *Debian*, *Fedora*, *Gentoo*, *Slackware v12.2* para *ARM* e *Inferno*.

En la parte del consumo energético los fabricantes garantizan que el *Sheevaplug* consume la décima parte de energía que consume un computador dedicado (2 Watt max), pudiendo trabajar las 24 horas del día los 7 días de la semana de manera continua. Además, puede ser utilizado como servidor *NAS*, *HTTP*, *FTP* y *SSH*. Adicionalmente, su precio es reducido (99 dólares) en comparación al precio de un ordenador común. Algunas desventajas que se pueden apreciar de este servidor, son la falta de puertos *USB* y tener antena *WIFI* integrada.

6.3.2. Raspberry Pi

Es un miniordenador que se ha enfocado a estimular la enseñanza en las Tecnologías de la Información TI. Actualmente existen diferentes modelos, como son: el *Raspberry PI A*, *Raspberry PI B*, *Raspberry PI B+*, *Raspberry PI A+*, *Raspberry PI 2 B*, *Raspberry PI Zero* y *Raspberry PI 3* (Raspberry-Pi, 2016). En esencia lo que los diferencia

Capítulo No 6. Materiales

son aspectos tales como: la cantidad de puertos USB disponibles, el consumo energético, la frecuencia del procesador, la cantidad de memoria RAM, la frecuencia de la GPU y si posee o no interfaces para periféricos (ver tabla 6-9).

Tabla 6-9 Características entre modelos de la Raspberry PI.

Característica	Modelos de Raspberry Pi					
	A	A+	B	B+	2B	3B
SoC (Chip)	Broadcom BCM 2835	Broadcom BCM 2835	Broadcom BCM 2835	Broadcom BCM 2835	Broadcom BCM 2836	Broadcom BCM2387
CPU	ARM1176J ZF-S a 700 MHz	ARM1176J ZF-S a 700 MHz	ARM1176J ZF-S a 700 MHz	ARM1176J ZF-S a 700 MHz	ARM Cortex- A7 cuatro núcleos a 900 Mhz	ARM Cortex- A53 a 1.2GHz
GPU	VideoCore IV a 250 Mhz	VideoCore IV a 250 Mhz	VideoCore IV a 250 Mhz	VideoCore IV a 250 Mhz	VideoCor e IV a 250 Mhz	Dual Core VideoCor e IV 3D graphics core
Memoria RAM	256 MB a 400 Mhz	256 MB a 400 Mhz	512 MB a 400 Mhz	512 MB a 400 Mhz	1 GB a 450 Mhz	1GB LPDDR2
Entradas de vídeo	Cámara CSI	Cámara CSI	Cámara CSI	Cámara CSI	Cámara CSI	Cámara CSI-2
Salidas de vídeo	HDMI 1.4, conector RCA	HDMI 1.4, conector TRRS	HDMI 1.4, conector TRRS	HDMI 1.4, conector TRRS	HDMI 1.4, conector TRRS	HDMI 1.4, conector TRRS
Salidas de audio	Jack de 3.5 mm (auriculares , HDMI	Jack de 3.5 mm (auriculares , HDMI	Jack de 3.5 mm (auriculares , HDMI	Jack de 3.5 mm (auriculares , HDMI	Jack de 3.5 mm (auricular es), HDMI	Jack de 3.5 mm (auricular es), HDMI
Conectores USB 2.0	1	1	2	4	4	4
Tarjetas de almacenami ento	SD	microSD	SD	microSD	microSD	microSD
Conexión a red	No	No	Ethernet 10/100 Mbit/sg	Ethernet 10/100 Mbit/sg	Ethernet 10/100 Mbit/sg	Ethernet 10/100 Mbit/sg y WI-FI integrado

Capítulo No 6. Materiales

Interfaz periférica (GPIO)	8	17	8	17	17	40
Tamaño	85.6 x 56.5 mm	65 x 56.5 mm	85.6 x 56.5 mm	85.6 x 56.5 mm	85.6 x 56.5 mm	85.6 x 56.5 mm
Peso	45 gramos	23 gramos	45 gramos	45 gramos	45 gramos	45 gramos
Consumo	1.5W/5V	1W/5V	3.5W/5V	3W/5V	5V	5V1, 2.5A
Precio	€ 25	€ 20	€ 30	€ 35	€ 35	€ 35

Fuente: (Pascual, 2015)

Raspberry utiliza en su sistema operativo algunas distribuciones de *Linux*, tales como: *SUSE Linux Enterprise Server*, *Ubuntu Mate*, *Arch Linux*, *Pidora* y *Raspbian*, aunque esta última es la más utilizada, también es compatible con la versión de *Window 10 IoT*. Todos los *SO* anteriormente mencionados cuentan con comunidades activas de desarrolladores y material suficiente en la web para la creación de aplicaciones utilizando *Raspberry Pi*.

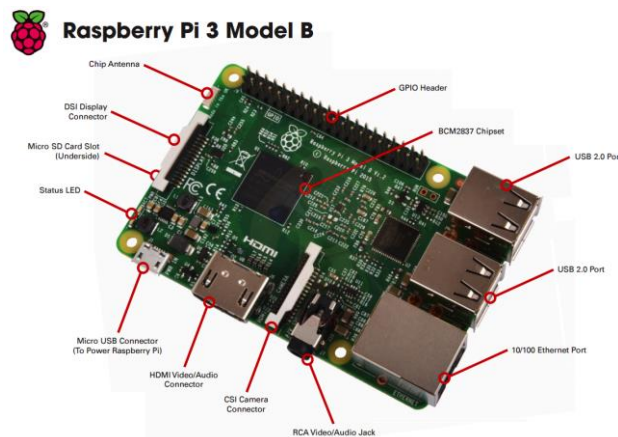


Figura 6-9 Raspberry PI 3 Model B.

Fuente: (Raspberry-Pi, 2016).

La *Raspberry PI 3B* es una buena opción a implementar como posible servidor de red, debido a sus prestaciones de hardware, su extendida compatibilidad con múltiples sistemas operativos, *WiFi* y *Bluetooth 4.1* integrados, mayor cantidad de puertos USB, amplia comunidad activa de desarrolladores y costo considerablemente económico, características que superan al *Sheevaplug*. Adicionalmente, la *Raspberry PI* ha sido puesta a

Capítulo No 6. Materiales

prueba como servidor en la nube para almacenamiento de aplicaciones en tiempo real, como se evidencia en (Princy & Nigel, 2015) y (Kumar & Jatoth, 2015).

La conexión entre las *WSN* y un sistema de almacenamiento de información para la visualización de los datos a través de un servidor necesita una estructura para su completa integración, para ello se presentan las arquitecturas cliente servidor.

6.4 ARQUITECTURAS CLIENTE SERVIDOR

Los sistemas basados en arquitecturas cliente servidor consisten en la combinación de objetos el cliente que hace las solicitudes y el servidor el encargado de atenderlas, que al parecer se encuentran separados pero que en realidad se comunican a través de una red para realizar tareas en conjunto. A continuación, se presenta un análisis de las arquitecturas más conocidas y utilizadas.

6.4.1. LAMP

Está conformado por un conjunto de herramientas libres que son ampliamente utilizadas en la actualidad, en una gran variedad de implementaciones (ver tabla 6-10). Consta de un sistema operativo, un servidor web, una base de datos y un lenguaje de programación. Ofrece una alternativa rápida y eficaz para el desarrollo de aplicaciones web a un bajo costo por ser una alternativa con tecnologías independientes entre sí. Un aspecto negativo es que al ser un sistema que opera con Linux, no ofrece soporte para Windows server (muy utilizado hoy en día), y tampoco opera con la base de datos de *Oracle* (Ibiblio, 2016).

LAMP es el acrónimo que representa las herramientas que están incluidas en la estructura, cuyas iniciales son: (1) “L”: Sistema operativo base de la plataforma, (2) “A”: Servidor web utilizado en la plataforma, (3) “M”: Gestores de la base de datos en la

Capítulo No 6. Materiales

plataforma y (4) “P”: Lenguajes en los cuales se programa la plataforma.

Tabla 6-10 Elementos que conforman a LAMP.

<i>L</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>P</i>
<i>Linux</i>	<i>Apache</i>	<i>MySQL</i>	<i>Perl</i>
		<i>MariaDB</i>	<i>Phyton</i>
			<i>PHP</i>

Tabla 6-11 Elementos de una arquitectura LAMP.

<i>Cliente WEB</i>	<i>DNS server</i>	<i>WEB server</i>	<i>PHP module</i>	<i>Aplicación</i>	<i>SGDB</i>
Explorador web	Convertor de nombres a <i>IP</i>	Almacena información de la <i>web</i>	Procesa ficheros <i>PHP</i>	Lista de ficheros <i>PHP</i>	Gestión de base de datos

Los pasos que realizan el cliente y el servidor para el proceso de una petición en *LAMP* se detallan en la figura 6-10 y han sido documentados de (Ibiblio, 2016).

1. El cliente *web*, solicita la correcta conversión del nombre de una máquina al servidor *DNS*.
2. El servidor *DNS* recolecta y maneja la solicitud además de realizar las consultas necesarias para obtener la dirección *IP*.
3. Devuelve la dirección *IP* descifrada del servidor *web* al navegador.
4. Cliente *web*, siguiendo el método *GET*, a través de una *URL* solicita la información de la dirección *IP* del servidor *web*, el puerto de éste, la *URL* y otros parámetros.
5. El servidor *web*, analiza y controla los accesos además de ubicar los recursos.
6. El servidor *web*, selecciona el módulo *PHP* para interpretar el fichero elegido.
7. Módulo de *PHP*, ejecuta el fichero *PHP* elegido.

Capítulo No 6. Materiales

8. Aplicación *PHP*, procesa los parámetros *GET* (forma de pasos de parámetros a través de *URL*) o *POST* (forma de pasos mediante formularios).
9. Aplicación *PHP*, realiza las llamadas *SQL* (lenguaje de consulta estructurado) al servidor *SGBD* (gestión de base de datos).
10. *SGBD*, recoge y procesa la petición *SQL*.
11. *SGBD*, devuelve la solicitud.
12. Aplicación *PHP*, procesa dichos datos devueltos por el *SGBD* y genera un *HTML* final.
13. Modulo *PHP*, convierte el *HTML* al servidor web.
14. Servidor web, devuelve el *HTML* al cliente web.
15. Cliente web, Presenta el *HTML* resultante de los pasos anteriores.

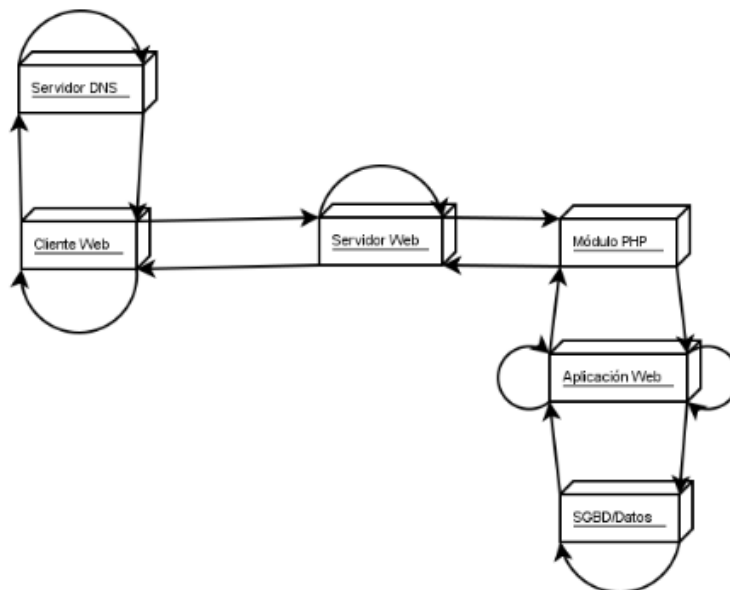


Figura 6-10 Proceso de una petición en LAMP.
Fuente: (Ibiblio, 2016)

El Sistema Gestor de Bases de Datos (*SGBD*) *MySQL*, que integra a *LAMP* primordialmente posibilita la administración de base de datos. Fue desarrollada por *Oracle*

Capítulo No 6. Materiales

Corporation, reconocida como la principal administradora a nivel mundial de base de datos de código abierto, con múltiples casos de éxito en cuanto a la elaboración de entornos de desarrollo (MySQL, 2016).

MySQL tiene la capacidad de almacenar la base de datos de manera relacional, lo cual permite archivar datos en tablas separadas, en lugar de almacenarlos todos juntos en un solo archivo. Gracias a este tipo de almacenamiento la velocidad y la flexibilidad para gestionar la base de datos es mucho más eficiente, respecto a otros *SGBD*. Las tablas que integran la base de datos en una solución *MySQL*, se conectan a través de relaciones definidas que permiten generar información a partir de consultas efectuadas a diferentes tablas de la base de datos.

MySQL es comúnmente utilizado en aplicaciones web tales como *Wordpress* o *phpBB*, en plataformas como *Linux* y por herramientas para el seguimiento de errores como *Bugzilla*, también se encuentra muy ligada a *PHP* (*Pre Hypertext Processor*) lenguaje de programación diseñado principalmente para el desarrollo en la web de contenido dinámico (texto, imágenes, etc) siendo el primer lenguaje que podía incorporar directamente un documento *HTML* (PHP-Group, 2016). El sistema de administración de *MySQL* ofrece una serie de ventajas respecto a otros *SGBD*, entre las que se destacan: el uso de claves foráneas, completa seguridad al momento de conectarse, multiplataforma, amplio soporte en SQL y capacidad de personalización de mecanismos de almacenamiento (MySQL, 2016).

El *Apache web server*, es un servidor *HTTP* cuya característica a destacar, es que es de código abierto y en la actualidad sigue en desarrollo por un grupo de usuarios bajo la supervisión de la compañía fundadora *Apache Software Foundation*. Desde 1996 es el

Capítulo No 6. Materiales

servidor web más utilizado, en el 2005 había sido implementado en el 70% de los sitios web en el mundo y para el 2009 llegó a alojar más de 100 millones de sitios web, gracias a su comunidad activa de usuarios y desarrolladores. Las vulnerabilidades que presenta en materia de seguridad, han sido resueltas haciéndolo muy seguro hoy en día (Apache, 2017). Es utilizado en la actualidad para enviar páginas web a la *World Wide Web*, y muchas aplicaciones de la web están diseñadas para tener características propias de Apache.

6.4.2. XAMPP

Por otra parte, se encuentra la arquitectura *XAMPP*, software libre que opera con el sistema de gestión de bases de datos *MySQL*, servidor Apache y los lenguajes *PHP* y Perl relacionados en la sección 5.4.1. La X hace referencia a su funcionamiento en los diferentes sistemas operativos utilizados *Windows*, *Linux*, *MacOS* y *Solaris* (Apachefriends, 2017).

Tabla 6-12 Elementos que conforman a XAMPP

<i>X</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>P</i>
Multiplataforma	<i>Apache</i>	<i>MySQL</i> <i>MariaDB</i>	<i>Perl</i> <i>Phyton</i>

Aunque guardan bastante semejanza a simple vista, en realidad presentan algunas diferencias entre sí:

Tabla 6-13 Comparación LAMP y XAMPP.

<i>LAMP</i>	<i>XAMPP</i>
Solo opera en <i>Linux</i> .	Multiplataforma.
Puede ser utilizado para servidores web públicos.	No es recomendable para servidores web públicos. Solo para desarrollo y pruebas.
Es más compleja su configuración.	Provee una configuración totalmente funcional.
Mayor facilidad al actualizar.	Es necesario reinstalar <i>XAMPP</i> para poder actualizar sus componentes.
Es más seguro.	Se puede iniciar y detener fácilmente.

(Apachefriends, 2017)

Capítulo No 6. Materiales

Aunque la seguridad en *XAMPP* es considerado uno de sus puntos débiles con algunas modificaciones en su configuración es posible corregir esta falencia.

Independientemente de esto, se escogió *XAMPP* por ser multiplataforma, la facilidad que brinda al momento de la instalación y por su enfoque al desarrollo y testeo de servicios web teniendo en cuenta que el modelo de red planteado en esta investigación es un prototipo.

Analizados los componentes que conforman una *WSN*, se escogió *RPL* como protocolos de comunicación, el sensor *SHT11* como elemento de interacción directa con el medio para la captura de datos y la plataforma *Z1* de *Zolertia* encargada de condensar el resto de componentes para conformar las motas que conformaran el modelo de despliegue de la *WSN* planteada y la arquitectura cliente servidor *XAMPP* para el desarrollo de la interfaz web para el almacenamiento y visualización de los datos.

Capítulo No 7. Metodología

7. METODOLOGÍA

En este capítulo se condensan los aspectos tenidos en cuenta para el desarrollo de las pruebas de radioenlace con los equipos *ZI*. Se detallan y realizan las pruebas en campo para evaluar las pérdidas de paquetes, el *RSSI* y *LQI* entre equipos a diferentes distancias. Luego se especifican los procedimientos a seguir para el diseño del modelo de despliegue de la red teniendo en cuenta la cobertura de las motas y los presupuestos de enlace entre ellos, los cuales se verifican con el software *Radio Mobile*. Por último se realizar una prueba de captura de datos en campo y se presenta el almacenamiento de visualización de los datos a través del aplicativo *web*.

7.1 CONSIDERACIONES INICIALES DE DISEÑO

Para el diseño de la red primero se realizaron pruebas de conexión y envío de paquetes a diferentes distancias entre un nodo colector y el nodo sumidero o *Gateway*. Ambos conformados por motas *ZI* de la empresa *Zolertia*, con direccionamiento *IPv6* y protocolo *RPL*. Con la ayuda de la herramienta *ping6* se evaluaron las pérdidas de paquetes en los enlaces establecidos a distancias de 10 metros con línea de vista, 10 metros con obstáculos, 50 metros con línea de vista y 100 metros con línea de vista, no se realizaron con obstáculos a 50 y 100 metros por falta locativa. Las estadísticas obtenidas a través de *ping6* arrojan el *RTT* que es el *Round Trip Time*, *min* que es el tiempo mínimo, *avg* que es el *average*, *max* el tiempo máximo y *mdev* desviación media, en el formato *RTT min/avg/max/mdev*, esto define los intervalos de tiempo en milisegundos, de ida y vuelta de los paquetes eco utilizados por la herramienta *ping6* (CISCO, 2017).

Capítulo No 7. Metodología

Se midieron los niveles de *RSSI* cuyo principio de medición describe la relación entre la potencia transmitida y la recibida de la señal inalámbrica y la distancia entre los nodos (Xu, Liu, Lang, Zhang, & Wang, 2010), y *LQI* asociado a la recepción de paquetes *PRR* (*Packet Reception Rate*) ambos parámetros relacionados con las mediciones de cobertura en *WSN* (Bartolomé Arquillo et al., 2007). Se realizaron 10 pruebas por cada enlace con una duración de 10 minutos cada una, para tener una mayor cantidad de datos y muestras más representativas; similar a la cantidad de pruebas utilizadas por (Estévez et al., 2016) para analizar el algoritmo de enrutamiento propuesto por los autores, el cual está basado en una agrupación jerárquica asignada dinámicamente y que se compara con otros algoritmos de encaminamiento. Por último, los datos fueron analizados a través de test estadísticos en *Matlab*®.

Por defecto, la mota *ZI* tiene una potencia de transmisión establecida en 0 dBm (1mW) como nivel máximo soportado. En la tabla 7-1 se detallan los niveles de potencia permitidos y configurables por software, dependiendo la potencia seleccionada los niveles de *RSSI* se ven afectados; estos niveles oscilan de 0 a -100, donde cero (0 dbm) o valores cercanos, son considerados indicadores de un buen enlace. Mientras que los valores cercanos a (-100 dbm) indican un mal enlace, muchas veces causado por reflexiones sobre objetos metálicos, superposición, polarización de los campos electromagnéticos, difracción sobre obstáculos, entre otros, como así lo indican (Colina et al., 2016)(Blumenthal, Grossmann, Golatowski, & Timmermann, 2007) y (Y. Wang, Guardiola, & Wu, 2014). Pero, se considera a la distancia como el factor que más influye en una baja calidad de la señal, de acuerdo con (Mallinson, Drane, & Hussain, 2007).

Capítulo No 7. Metodología

Por otra parte, los niveles de LQI oscilan entre 110 como el nivel de calidad máximo en la trama, y 50 como niveles de calidad baja, estos no tienden a sufrir variaciones significativas con la distancia a diferencia del *RSSI* (Mian, Alvi, Khan, Zulqarnain, & Iqbal, 2016).

Para la lectura de los valores *RSSI* y *LQI* en la mota *ZI*, se utiliza la *API* del transceptor de la siguiente manera (Colina et al., 2016):

```
rd = NETSTACK_RADIO.get_value(RADIO_PARAM_RSSI, value)
```

Siendo *value* una variable en forma de apuntador que almacena el valor de *RSSI* y *rd* será el *RADIO_RESULT_INVALID_VALUE* O *RADIO_RESULT_OK*.

Luego la lectura del valor capturado, se realiza con

```
packetbuf_attr(PACKETBUF_ATTR_RSSI);
```

La captura del valor de LQI se lleva a cabo de la siguiente forma:

```
rd = NETSTACK_RADIO.get_value(PACKETBUF_ATTR_LINK_QUALITY,  
value);
```

Siendo *value* una variable en forma de apuntador que almacena el valor de LQI y *rd* será el *RADIO_RESULT_INVALID_VALUE* O *RADIO_RESULT_OK*.

De acuerdo con (Mian et al., 2016) el acoplamiento de los equipos se ve afectado por la altura que tengan respecto al suelo y recomiendan alturas superiores a 1,5 metros para establecer enlaces de calidad óptima, por lo tanto se utilizó una altura de 1,6 metros para las pruebas.

Capítulo No 7. Metodología

Tabla 7-1 Niveles de potencia permitidos para la mota Z1.

<i>TX Power (dBm)</i>	<i>Value</i>	<i>mA</i>
0	31	17.4
-1	27	16.5
-3	23	15.2
-5	19	13.9
-7	15	12.5
-10	11	11.2
-15	7	9.9
-25	3	8.5

Para las pruebas de pérdida de paquetes a diferentes distancias, se utilizó el código *02-border-router*, con el fin de configurar la mota sumidero o *Gateway*, (autoría de Niclas Finne, Joakin Eriksson y Nicolas Tsiftes), presente en la siguiente ruta:

```
home/Contiki/examples/Zolertia/tutorial/02-ipv6/02-border-router
La mota se conecta al puerto /dev/ttyUSB0 a una velocidad de 115.200 baudios, 8
```

bits sin paridad y un (1) bit de parada. Para la configuración del nodo emisor se utilizó el código *01-udp-local-multicast* autoría de la empresa *Zolertia*, presente en la siguiente ruta:

```
home/Contiki/examples/Zolertia/tutorial/02-ipv6/01-udp-local-multicast
```

7.2 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DEL MODELO DE DESPLIEGUE DE UNA WSN PARA EL CULTIVO DE YUCA

Las *WSN* tienen múltiples aplicaciones y pueden adaptarse a diferentes entornos ya sean de fácil o difícil acceso, para ello se han caracterizado los despliegues: aleatorio, regular y móvil.

El despliegue **aleatorio** es utilizado en zonas de grandes extensiones, uniformidad en el terreno y difícil acceso, en la cual los sensores en la mayoría de las veces son arrojados desde aeronaves y siguen una distribución aleatoria.

Capítulo No 7. Metodología

En el despliegue **regular** los nodos son instalados de manera fija después de una previa planeación, no están sujetos a seguir un patrón geométrico, pero se recomienda hacerlo, por la facilidad en cuanto cálculos matemáticos y distribución de los nodos.

Con el despliegue **móvil** los nodos pueden sufrir movimientos pasivos por causas externas como el viento o el agua sin afectar el funcionamiento de la red, compensando las limitantes que el entorno pueda presentar.

Es importante resaltar que los terrenos en los cuales se cultiva la yuca, son de fácil acceso para los campesinos, por lo tanto se optó por un **despliegue regular** con nodos colocados en posiciones fijas de manera estratégica, siguiendo un patrón geométrico para lograr una distribución homogénea de los nodos sobre el terreno. Para ello se hace uso de teselaciones, definidas como un embaldosado conformado por polígonos regulares en el caso de dos dimensiones; poliedros para tres dimensiones o politopos las de N-dimensiones. Las de dos dimensiones están conformadas por patrones capaces de cubrir superficies sin dejar espacios libres y sin que se traslapen entre sí, además se pueden especificar a través de las notaciones de *Schläfli* (María Gil-Jiménez, 2008). Las cuales definen a las teselaciones formadas por polígonos regulares de p aristas y q politopos, que rodea a cada polígono $\{p,q\}$ (Weisstein, 2017).

Las tres teselaciones de polígonos regulares conocidas son las conformadas por triángulos $\{3,6\}$, cuadrados $\{4,4\}$ y hexágonos $\{6,3\}$, ver figura 7-1.

Capítulo No 7. Metodología

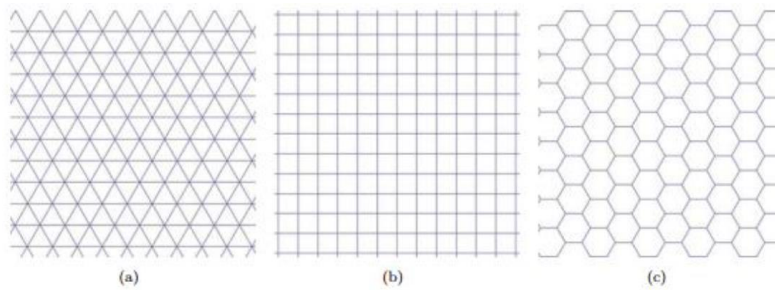


Figura 7-1 Tesselaciones de Schläfli: a) triángulos; b) cuadrados; c) hexágonos.

Fuente: (María Gil-Jiménez, 2008)

Partiendo del hecho de que una hectárea tiene un área de 10.000 m², son considerados pequeños agricultores de yuca, los que realizan sus cultivos en áreas de media, una o más hectáreas, hasta un máximo de 5 hectáreas. El modelo de despliegue de la WSN utilizado es el de tesselación cuadriculada, por la facilidad que brinda al momento de realizar la distribución de los equipos en terrenos cuadrados, y homogeneidad en las características de comunicación, especialmente para el rendimiento de cobertura. Para el diseño de este tipo de red, si se ubican los nodos sobre los vértices se obtiene una red con nodos equidistantes entre sí (Poe & Schmitt, 2009).

Con las tesselaciones de dos dimensiones surge el concepto de capas, apreciables en la figura 7-2. Son grupos de nodos alrededor de un nodo central a diferentes profundidades. Con el número de capas se puede calcular la cantidad de nodos a utilizar, ecuación (2), controlando que no sea una cantidad excesiva o arbitraria sino regida bajo conceptos matemáticos. Para la tesselación cuadriculada se tiene.

$$N = (2C+1)^2 \quad (2)$$

Fuente:(María Gil-Jiménez, 2008)

Capítulo No 7. Metodología

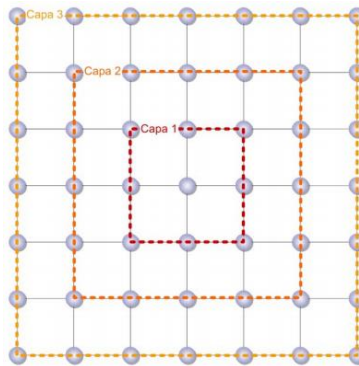


Figura 7-1 Distribución de nodos en las capas para la teselación cuadrada.
Fuente:(María Gil-Jiménez, 2008)

El despliegue se realiza en las coordenadas 10°26'24"N 75°02'43"W (ver figura 7-3), Finca Nueva Esperanza en el terreno conocido como Auyamal perteneciente al Municipio de Manatí.



Figura 7-2 Vista aérea del terreno planteado para el despliegue.

Con la ubicación geográfica y la teselación escogida, se procede a realizar el cálculo de la cobertura de cada sensor ubicado en los puntos de la teselación escogida. Se parte de un terreno circular con cuadrícula interna (ver figura 7-4) de acuerdo con (Poe & Schmitt, 2009). Donde d' es el área de cada cuadrado interno y puede calcularse dividiendo el área entera de un campo dado de radio R , con el número de celdas k . El valor exacto de k no se conoce, pero es aproximadamente $(\sqrt{n-1})^2$, con el valor de R y n (número de nodos) los autores realizaron unos ajustes a la ecuación (3) utilizada para calcular el r_{sense} (radio de

Capítulo No 7. Metodología

sensado del nodo) obteniendo la ecuación (4) brindándoles mejores resultados en las simulaciones.

$$r_{sense} = \sqrt{\frac{\pi R^2}{(\sqrt{n}-1)^2}} \quad (3)$$

Fuente: (Poe & Schmitt, 2009)

$$r_{sense} = \sqrt{\frac{\pi R^2}{n}} \quad (4)$$

Fuente: (Poe & Schmitt, 2009)

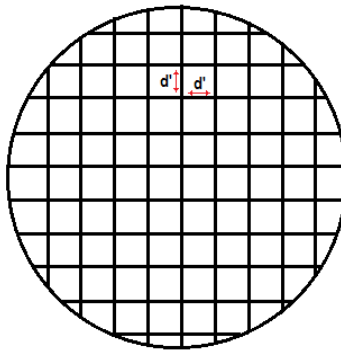


Figura 7-3 Plantilla para el cálculo de cobertura entre sensores.

Fuente:(Poe & Schmitt, 2009)

Se analiza la cobertura de la red con despliegues de 2, 3 y 4 capas, esto puede variar de acuerdo al tamaño del cultivo y la densidad de nodos que se desea en la red. El *Gateway* siempre debe ser posicionado en la casa central del terreno para facilidad del agricultor y aprovechamiento de la conexión eléctrica, en este caso sería en la esquina inferior derecha del cuadrado construido con los marcadores de posición en la figura 7-3.

Capítulo No 7. Metodología

Luego se realizó el presupuesto de enlace para validar las distancias utilizadas en las pruebas a través del cálculo de las ganancias y pérdidas que hay desde un transmisor a un receptor. Con la ubicación, los equipos y las distancias entre estos definidas por el cálculo de cobertura, se realiza el presupuesto de enlace partiendo de la sumatoria de la potencia del transmisor, ganancia de la antena del transmisor, pérdidas en los cables y conectores de la antena del transmisor y receptor, para obtener la ganancia total; luego se calculan las pérdidas en el espacio libre, utilizando una distancia entre nodos de 25, 18 y 14 m, y así poder deducir si la señal es suficiente para que el transmisor y el receptor estén comunicados.

7.3 PRUEBAS DE CAMPO

Tal como anteriormente se ha mencionado, con la ayuda de la herramienta *ping6* se evaluaron las pérdidas de paquetes en los enlaces establecidos a distancias de 10 metros con línea de vista, 10 metros con obstáculos, 50 metros con línea de vista y 100 metros con línea de vista, no se realizaron con obstáculos a 50 y 100 metros por falta locativa.

7.3.1. Prueba entre dos nodos a 10 metros con línea de vista (Indoor)

La primera prueba se realizó entre dos nodos con una distancia de 10 metros entre ellos, en un ambiente *indoor* y línea de vista, figura 7-5. Con la herramienta *ping6* se evaluó la conectividad y pérdida de paquetes entre el nodo *Gateway* y el nodo emisor.

Dirección IPv6 nodo 1 (*Gateway*): fd00::c30c:0:0:13ac

Dirección IPv6 nodo 2 (emisor): fd00::c30c:0:0:1401

Capítulo No 7. Metodología

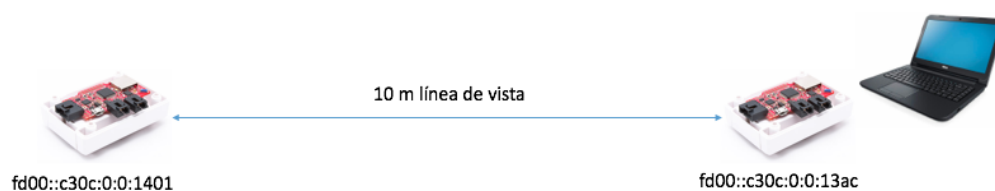


Figura 7-4 Diagrama de un enlace con línea de vista entre 2 nodos.
Fuente: (Caicedo – Ortiz, J).

En la tabla 7-2 se muestran los valores de RTT min/avg/max/mdev, cantidad de paquetes enviados y recibidos y también el porcentaje de paquetes perdidos en cada prueba.

Tabla 7-2 Prueba de 10 m entre nodos con línea de vista.

Prueba	Paquetes enviados	Paquetes recibidos	Porcentaje de paquetes perdidos	min	avg	max	mdev
1	631	631	0%	35.699	36.019	43.425	0.491
2	601	601	0%	35.740	35.995	38.965	0.329
3	601	601	0%	35.715	36.033	39.050	0.446
4	601	601	0%	35.744	36.020	39.065	0.406
5	611	611	0%	35.748	35.986	39.067	0.308
6	601	601	0%	35.717	36.010	39.049	0.405
7	610	609	0%	35.722	36.046	39.171	0.514
8	601	601	0%	35.705	35.972	38.948	0.322
9	601	601	0%	35.738	35.962	39.218	0.276
10	600	600	0%	35.731	35.985	39.188	0.477

La medición del *RSSI* y *LQI* se hizo con el código presente en la ruta:

```
home/Contiki/examples/Zolertia/tutorial/02-ipv6/01-udp-local-multicas
```

El nodo emisor enviará los valores de *RSSI* y *LQI* cada 30 segundos, por lo tanto, en cada prueba de 10 minutos se obtuvieron 20 valores por cada una para un total de 200 datos relacionados en la tabla 7-3.

Las direcciones IPv6 en cada mota son las siguientes:

Dirección IPv6 nodo 1 (): `fe80::c30c:0:0:13ac`

Dirección IPv6 nodo 2 (emisor): `fe80::c30c:0:0:1401`

Capítulo No 7. Metodología

Tabla 7-3 RSSI - LQI 10 m entre nodos con línea de vista.

Prueba	No	RSSI	LQI
1	1	-45dBm	108
	2	-45dBm	108
	3	-45dBm	108
	4	-45dBm	108
	5	-45dBm	108
	6	-45dBm	106
	7	-45dBm	108
	8	-45dBm	108
	9	-45dBm	108
	10	-45dBm	107
	11	-44dBm	108
	12	-45dBm	108
	13	-45dBm	108
	14	-45dBm	107
	15	-45dBm	108
	16	-45dBm	108
	17	-45dBm	107
	18	-45dBm	107
	19	-45dBm	108
	20	-45dBm	108
4	1	-45dBm	108
	2	-45dBm	106
	3	-45dBm	108
	4	-45dBm	107
	5	-44dBm	108
	6	-45dBm	106
	7	-45dBm	108
	8	-45dBm	107
	9	-44dBm	107
	10	-45dBm	108
	11	-45dBm	106
	12	-45dBm	108
	13	-45dBm	107
	14	-45dBm	108
	15	-45dBm	108
	16	-44dBm	108
	17	-45dBm	108
	18	-45dBm	107
	19	-45dBm	107
	20	-45dBm	108
7	1	-45dBm	108
	2	-44dBm	108
	3	-44dBm	105
	4	-44dBm	105
	5	-44dBm	108
	6	-44dBm	108
	7	-44dBm	108
	8	-44dBm	108
	9	-44dBm	106
	10	-44dBm	108
	11	-44dBm	106
	12	-44dBm	106
2	1	-45dBm	108
	2	-45dBm	108
	3	-44dBm	107
	4	-45dBm	107
	5	-44dBm	108
	6	-44dBm	107
	7	-44dBm	108
	8	-45dBm	107
	9	-45dBm	107
	10	-45dBm	107
	11	-45dBm	107
	12	-44dBm	107
	13	-45dBm	108
	14	-44dBm	108
	15	-44dBm	107
	16	-44dBm	107
	17	-59dBm	107
	18	-44dBm	107
	19	-44dBm	107
	20	-44dBm	107
5	1	-45dBm	107
	2	-44dBm	108
	3	-44dBm	108
	4	-44dBm	107
	5	-44dBm	108
	6	-44dBm	105
	7	-44dBm	108
	8	-44dBm	107
	9	-44dBm	108
	10	-44dBm	108
	11	-44dBm	106
	12	-44dBm	108
	13	-53dBm	108
	14	-44dBm	107
	15	-44dBm	108
	16	-44dBm	108
	17	-44dBm	106
	18	-44dBm	108
	19	-44dBm	108
	20	-44dBm	107
8	1	-51dBm	107
	2	-44dBm	108
	3	-44dBm	106
	4	-44dBm	106
	5	-44dBm	108
	6	-44dBm	107
	7	-44dBm	106
	8	-44dBm	107
	9	-43dBm	108
	10	-43dBm	108
	11	-44dBm	108
	12	-44dBm	107
3	1	-44dBm	108
	2	-44dBm	106
	3	-44dBm	107
	4	-45dBm	106
	5	-45dBm	108
	6	-45dBm	108
	7	-51dBm	108
	8	-45dBm	108
	9	-45dBm	108
	10	-45dBm	108
	11	-44dBm	108
	12	-45dBm	108
	13	-45dBm	106
	14	-45dBm	108
	15	-45dBm	108
	16	-44dBm	107
	17	-45dBm	107
	18	-45dBm	106
	19	-45dBm	106
	20	-44dBm	106
6	1	-44dBm	108
	2	-45dBm	107
	3	-44dBm	105
	4	-44dBm	107
	5	-44dBm	108
	6	-44dBm	107
	7	-44dBm	107
	8	-44dBm	108
	9	-45dBm	107
	10	-44dBm	108
	11	-44dBm	108
	12	-44dBm	108
	13	-43dBm	108
	14	-44dBm	108
	15	-43dBm	107
	16	-44dBm	108
	17	-43dBm	106
	18	-44dBm	108
	19	-44dBm	106
	20	-44dBm	108
9	1	-44dBm	106
	2	-44dBm	104
	3	-44dBm	107
	4	-44dBm	108
	5	-44dBm	108
	6	-44dBm	108
	7	-44dBm	108
	8	-43dBm	107
	9	-44dBm	107
	10	-44dBm	108
	11	-44dBm	108
	12	-43dBm	106

Capítulo No 7. Metodología

	13	-44dBm	108
	14	-44dBm	107
	15	-44dBm	107
	16	-44dBm	106
	17	-44dBm	107
	18	-44dBm	108
	19	-44dBm	108
	20	-44dBm	108
10	1	-44dBm	106
	2	-44dBm	108
	3	-49dBm	108
	4	-51dBm	107
	5	-52dBm	107
	6	-50dBm	107
	7	-49dBm	108
	8	-50dBm	108
	9	-49dBm	108
	10	-49dBm	108
	11	-52dBm	108
	12	-52dBm	108
	13	-51dBm	108
	14	-49dBm	108
	15	-51dBm	108
	16	-50dBm	107
	17	-51dBm	106
	18	-49dBm	108
	19	-52dBm	108
	20	-51dBm	108

	13	-44dBm	108
	14	-43dBm	108
	15	-44dBm	108
	16	-44dBm	108
	17	-44dBm	108
	18	-44dBm	107
	19	-43dBm	107
	20	-44dBm	108

	13	-44dBm	107
	14	-44dBm	108
	15	-44dBm	108
	16	-44dBm	106
	17	-44dBm	107
	18	-43dBm	108
	19	-43dBm	108
	20	-44dBm	108

7.3.2. Prueba entre dos nodos a 10 metros con obstáculos

La segunda prueba se realizó entre dos nodos con una distancia de 10 metros entre ellos, en un ambiente *indoor*, los obstáculos consistieron en tres paredes de bloque con 11 cm de ancho y distancia de 2,5 m entre ellas como se aprecia en la figura 7-6. Para evaluar la conectividad y pérdida de paquetes entre el nodo y el nodo emisor se utilizó la herramienta *ping6*. El código utilizado es el mismo que se implementó en la prueba anteriormente descrita.

Dirección IPv6 nodo 1 (): fd00::c30c:0:0:13ac

Dirección IPv6 nodo 2 (emisor): fd00::c30c:0:0:1401

Capítulo No 7. Metodología

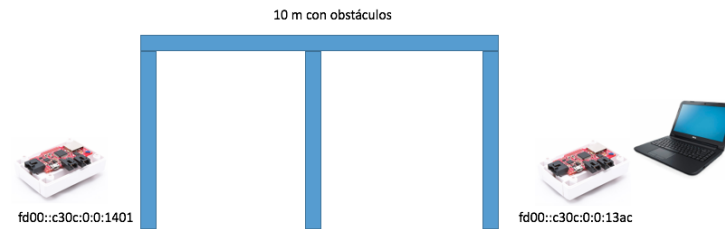


Figura 7-5 Diagrama de enlace entre dos (2) nodos con obstáculos.
Fuente: (Caicedo–Ortiz, J).

En la tabla 7-4 se muestran los valores de RTT min/avg/max/mdev, cantidad de paquetes enviados y recibidos y también el porcentaje de paquetes perdidos en cada prueba.

Tabla 7-4 Prueba con 10 m entre nodos con obstáculos.

Prueba	Paquetes enviados	Paquetes recibidos	Porcentaje de paquetes perdidos	min	avg	max	mdev
1	600	549	8%	35.335	35.601	38.550	0.300
2	601	586	2%	35.325	35.646	41.390	0.436
3	601	598	0%	35.293	35.579	38.546	0.340
4	603	599	0%	35.367	35.599	38.500	0.193
5	600	599	0%	35.325	35.573	38.483	0.233
6	600	596	0%	35.347	35.594	38.566	0.296
7	601	600	0%	35.312	35.730	79.548	2.169
8	601	599	0%	35.354	35.606	41.456	0.357
9	601	600	0%	35.351	35.586	38.604	0.260
10	600	593	1%	35.325	35.570	38.555	0.211

Para las mediciones de *RSSI* y *LQI*, durante esta prueba, se utilizó la misma configuración de la primera prueba.

Las direcciones IPV6 de cada nodo es la siguiente:

Dirección IPv6 nodo 1 (): fe80::c30c:0:0:13ac

Dirección IPv6 nodo 2 (emisor): fe80::c30c:0:0:1401

Capítulo No 7. Metodología

Tabla 7-5 RSSI - LQI en prueba a 10 m con obstáculos.

Prueba	No	RSSI	LQI	Prueba	No	RSSI	LQI	Prueba	No	RSSI	LQI
1	1	-84dBm	107	2	1	-85dBm	85	3	1	-85dBm	96
	2	-84dBm	103		2	-85dBm	105		2	-83dBm	107
	3	-84dBm	97		3	-87dBm	103		3	-86dBm	104
	4	-84dBm	106		4	-86dBm	105		4	-85dBm	96
	5	-83dBm	105		5	-90dBm	105		5	-85dBm	101
	6	-83dBm	103		6	-87dBm	103		6	-82dBm	105
	7	-82dBm	104		7	-84dBm	104		7	-82dBm	101
	8	-84dBm	104		8	-82dBm	100		8	-83dBm	105
	9	-84dBm	103		9	-83dBm	104		9	-86dBm	104
	10	-83dBm	102		10	-82dBm	106		10	-86dBm	104
	11	-83dBm	102		11	-82dBm	104		11	-86dBm	104
	12	-86dBm	101		12	-82dBm	103		12	Perdido	Perdido
	13	-85dBm	98		13	-82dBm	106		13	Perdido	Perdido
	14	-83dBm	101		14	-82dBm	96		14	-85dBm	92
	15	-84dBm	105		15	-82dBm	103		15	-82dBm	88
	16	-83dBm	107		16	-82dBm	100		16	-81dBm	94
	17	-84dBm	101		17	-82dBm	101		17	Perdido	Perdido
	18	-84dBm	101		18	-82dBm	101		18	Perdido	Perdido
	19	-84dBm	102		19	-83dBm	94		19	-80dBm	105
	20	-85dBm	102		20	-83dBm	97		20	-84dBm	108
4	1	-78dBm	105	5	1	-87dBm	95	6	1	-80dBm	104
	2	-79dBm	103		2	-81dBm	105		2	-80dBm	104
	3	-80dBm	101		3	-81dBm	105		3	-81dBm	103
	4	-81dBm	100		4	81dBm	107		4	-81dBm	108
	5	-79dBm	107		5	-84dBm	106		5	-81dBm	105
	6	-80dBm	107		6	-83dBm	104		6	-80dBm	105
	7	-84dBm	105		7	-82dBm	105		7	-81dBm	104

Capítulo No 7. Metodología

	8	-	104		8	-	107		8	-81dBm	107			
	9	83dBm	106		9	81dBm	101		9	-80dBm	105			
	10	-	102		10	82dBm	103		10	-80dBm	104			
	11	82dBm	104		11	-	107		11	-81dBm	105			
	12	-	105		12	85dBm	108		12	-82dBm	105			
	13	81dBm	106		13	-	106		13	-80dBm	107			
	14	-	103		14	79dBm	106		14	-83dBm	105			
	15	83dBm	101		15	-	99		15	-81dBm	105			
	16	-	106		16	90dBm	108		16	-82dBm	106			
	17	82dBm	104		17	-	105		17	-83dBm	105			
	18	-	106		18	80dBm	107		18	-82dBm	99			
	19	83dBm	87		19	-	103		19	-82dBm	107			
	20	-	106		20	80dBm	105		20	-81dBm	107			
	7	1	-		107	8	1		-	107	9	1	-77dBm	106
		2	80dBm		105		2		82dBm	106		2	-74dBm	108
		3	-		105		3		-	106		3	-74dBm	108
		4	82dBm		105		4		81dBm	107		4	-73dBm	107
		5	-		106		5		78dBm	107		5	-72dBm	106
		6	78dBm		107		6		-	107		6	-71dBm	107
		7	-		107		7		80dBm	107		7	-73dBm	108
8		81dBm	102	8	77dBm		105	8	-74dBm	108				
9		-	104	9	-		106	9	-74dBm	108				
10		82dBm	107	10	78dBm		107	10	-75dBm	107				
11		-	106	11	-		106	11	-76dBm	107				
12		78dBm	105	12	80dBm		108	12	-74dBm	108				
13		-	107	13	76dBm		Perdido	13	-77dBm	106				
14		81dBm	105	14	-		106	14	-76dBm	108				
15		-	107	15	78dBm		108	15	-74dBm	108				
16		82dBm	103	16	-		107	16	-74dBm	108				

Capítulo No 7. Metodología

	17	- 82dBm	105
	18	- 80dBm	106
	19	- 84dBm	105
	20	- 84dBm	101
10	1	Perdido	Perdido
	2	- 74dBm	107
	3	- 74dBm	105
	4	- 74dBm	107
	5	- 73dBm	106
	6	- 74dBm	108
	7	- 74dBm	108
	8	- 75dBm	106
	9	- 74dBm	108
	10	- 74dBm	108
	11	- 74dBm	108
	12	Perdido	Perdido
	13	- 73dBm	108
	14	- 74dBm	106
	15	- 77dBm	105
	16	- 76dBm	108
	17	Perdido	Perdido
	18	- 76dBm	105
	19	- 76dBm	107
	20	- 76dBm	107

	17	- 75dBm	106
	18	- 75dBm	107
	19	- 76dBm	108
	20	- 76dBm	108

	17	-74dBm	108
	18	-75dBm	106
	19	-74dBm	107
	20	-75dBm	107

7.3.3. Prueba entre dos (2) nodos a 50 metros con línea de vista

La tercera prueba se realizó entre dos nodos con una distancia de 50 metros entre ellos en un ambiente *outdoor* con línea de vista (no se realizaron pruebas *indoor* a esta distancia porque no se cuenta con la infraestructura para ello). Se utilizó la herramienta

Capítulo No 7. Metodología

ping6 para evaluar la conectividad y pérdida de paquetes entre el nodo *Gateway* y el nodo emisor.

Dirección IPv6 nodo 1 (*Gateway*): fd00::c30c:0:0:13ac

Dirección IPv6 nodo 2 (emisor): fd00::c30c:0:0:1401

En la tabla 7-6 se muestran los valores de RTT min/avg/max/mdev, cantidad de paquetes enviados y recibidos y también el porcentaje de paquetes perdidos en cada prueba.

Tabla 7-6 Prueba con 50 m entre nodos con línea de vista.

<i>Prueba</i>	<i>Paquetes enviados</i>	<i>Paquetes recibidos</i>	<i>Porcentaje de paquetes perdidos</i>	<i>min</i>	<i>avg</i>	<i>max</i>	<i>mdev</i>
1	602	599	0%	35.357	35.593	38.631	0.348
2	601	601	0%	35.336	35.762	99.329	2.733
3	601	600	0%	35.294	35.598	41.959	0.502
4	601	599	0%	35.346	35.791	168.508	5.441
5	601	601	0%	35.359	35.616	58.436	0.970
6	601	600	0%	35.741	35.991	39.051	0.343
7	601	601	0%	35.765	36.021	53.203	0.816
8	600	599	0%	35.753	36.016	43.463	0.447
9	601	599	0%	35.696	36.620	281.566	10.727
10	601	601	0%	35.738	35.998	40.162	0.364

Para las mediciones de *RSSI* y *LQI* durante esta prueba, se utilizó la misma configuración de la primera. Las direcciones IPV6 de cada nodo son las siguientes:

Dirección IPv6 nodo 1 (*Gateway*): fe80::c30c:0:0:13ac

Dirección IPv6 nodo 2 (emisor): fe80::c30c:0:0:1401

Capítulo No 7. Metodología

Tabla 7-7 RSSI - LQI en prueba a 50 m con línea de vista.

Prueba	No	RSSI	LQI	Prueba	No	RSSI	LQI	Prueba	No	RSSI	LQI
1	1	-67dBm	105	2	1	-68dBm	108	3	1	-68dBm	108
	2	-67dBm	107		2	-67dBm	108		2	-70dBm	108
	3	-69dBm	107		3	-69dBm	106		3	-70dBm	105
	4	-69dBm	106		4	-68dBm	108		4	-70dBm	106
	5	-69dBm	106		5	-68dBm	108		5	-71dBm	105
	6	-69dBm	105		6	-68dBm	106		6	-69dBm	106
	7	-70dBm	108		7	-69dBm	106		7	-71dBm	107
	8	-69dBm	106		8	-68dBm	107		8	-71dBm	108
	9	-70dBm	106		9	-67dBm	106		9	-70dBm	107
	10	-69dBm	108		10	-68dBm	107		10	-70dBm	107
	11	-70dBm	107		11	-68dBm	108		11	-69dBm	107
	12	-68dBm	108		12	-67dBm	107		12	-73dBm	107
	13	-68dBm	105		13	-67dBm	108		13	-70dBm	108
	14	-69dBm	107		14	-67dBm	106		14	-70dBm	107
	15	-69dBm	107		15	-67dBm	106		15	-72dBm	107
	16	-68dBm	108		16	-68dBm	108		16	-69dBm	106
	17	-69dBm	107		17	-68dBm	108		17	-72dBm	106
	18	-68dBm	108		18	-68dBm	107		18	-70dBm	108
	19	-70dBm	107		19	-68dBm	108		19	-70dBm	107
	20	-70dBm	104		20	-69dBm	104		20	-70dBm	108
4	1	-70dBm	105	5	1	-68dBm	107	6	1	-61dBm	107
	2	-67dBm	105		2	-69dBm	105		2	-60dBm	106
	3	-68dBm	107		3	-68dBm	108		3	-62dBm	106
	4	-72dBm	105		4	-68dBm	103		4	-62dBm	108
	5	-68dBm	108		5	-70dBm	107		5	-65dBm	107
	6	-70dBm	107		6	-68dBm	105		6	-62dBm	108
	7	-79dBm	105		7	-68dBm	106		7	-62dBm	107
	8	-70dBm	106		8	-69dBm	106		8	-62dBm	107
	9	-65dBm	107		9	-70dBm	107		9	-62dBm	108
	10	-68dBm	108		10	-69dBm	107		10	-62dBm	107
	11	-68dBm	107		11	-68dBm	108		11	-62dBm	107
	12	-70dBm	107		12	-68dBm	107		12	-62dBm	107
	13	-68dBm	106		13	-70dBm	106		13	-62dBm	106
	14	-67dBm	106		14	-68dBm	107		14	-64dBm	106
	15	-67dBm	108		15	-69dBm	106		15	-62dBm	105
	16	-68dBm	108		16	-69dBm	106		16	-64dBm	107
	17	-70dBm	104		17	-69dBm	108		17	-62dBm	108
	18	-68dBm	107		18	-70dBm	108		18	-62dBm	105
	19	-68dBm	107		19	-69dBm	108		19	-62dBm	107
	20	-67dBm	108		20	-68dBm	107		20	-62dBm	108
7	1	-62dBm	105	8	1	-62dBm	105	9	1	-62dBm	106
	2	-62dBm	106		2	-60dBm	107		2	-62dBm	106
	3	-62dBm	108		3	-62dBm	108		3	-64dBm	105
	4	-63dBm	108		4	-62dBm	107		4	-63dBm	108
	5	-62dBm	106		5	-62dBm	108		5	-62dBm	108
	6	-62dBm	106		6	-60dBm	108		6	-62dBm	108

Capítulo No 7. Metodología

	7	-62dBm	107	
	8	-62dBm	107	
	9	-63dBm	107	
	10	-65dBm	108	
	11	-63dBm	108	
	12	-64dBm	106	
	13	-62dBm	107	
	14	-62dBm	107	
	15	-64dBm	106	
	16	-64dBm	108	
	17	-62dBm	108	
	18	-66dBm	107	
	19	-62dBm	107	
	20	-62dBm	108	
	10	1	-60dBm	108
		2	-60dBm	106
		3	-60dBm	107
		4	-60dBm	108
		5	-61dBm	105
		6	-61dBm	106
7		-64dBm	107	
8		-62dBm	108	
9		-60dBm	107	
10		-61dBm	108	
11		-61dBm	108	
12		-62dBm	106	
13		-62dBm	104	
14		-62dBm	106	
15		-62dBm	107	
16		-62dBm	107	
17		-64dBm	105	
18		-61dBm	106	
19		-60dBm	106	
20		-63dBm	108	

	7	-62dBm	107
	8	-61dBm	108
	9	-62dBm	108
	10	-62dBm	107
	11	-62dBm	108
	12	-60dBm	107
	13	-61dBm	105
	14	-60dBm	106
	15	-61dBm	106
	16	-61dBm	108
	17	-61dBm	107
	18	-62dBm	107
	19	-61dBm	108
	20	-62dBm	107

	7	-62dBm	108
	8	-62dBm	108
	9	-62dBm	107
	10	-61dBm	106
	11	-61dBm	108
	12	-62dBm	104
	13	-62dBm	108
	14	-61dBm	106
	15	-62dBm	108
	16	-61dBm	108
	17	-62dBm	106
	18	-61dBm	107
	19	-64dBm	107
	20	-66dBm	108

7.3.4. Prueba entre dos (2) nodos a 100 metros con línea de vista

Se realizó entre dos nodos con una distancia de 100 metros entre ellos en un ambiente *outdoor* con línea de vista (no se realizaron pruebas *indoor* a esta distancia porque no se cuenta con la infraestructura para ello). Se utilizó la herramienta *ping6* para evaluar la conectividad y pérdida de paquetes entre el nodo *Gateway* y el nodo emisor.

Dirección IPv6 nodo 1 (Gateway): fd00::c30c:0:0:13ac

Capítulo No 7. Metodología

Dirección IPv6 nodo 2 (emisor): fd00::c30c:0:0:1401

En la tabla 7-8 se muestran los valores de RTT min/avg/max/mdev, cantidad de paquetes enviados, recibidos y también el porcentaje de paquetes perdidos en cada prueba.

Tabla 7-8 Prueba a 100 m con línea de vista.

<i>Prueba</i>	<i>Paquetes enviados</i>	<i>Paquetes recibidos</i>	<i>Porcentaje de paquetes perdidos</i>	<i>min</i>	<i>avg</i>	<i>max</i>	<i>mdev</i>
1	601	572	4%	35.242	35.817	100.367	3.957
2	602	597	0%	35.225	35.477	38.370	0.370
3	601	586	2%	35.222	35.481	38.525	0.395
4	601	581	3%	35.206	35.480	38.475	0.377
5	602	572	4%	35.255	35.506	53.709	0.823
6	601	601	0%	35.405	36.350	250.447	10.967
7	602	597	0%	35.402	35.672	41.483	0.351
8	602	602	0%	35.440	35.671	38.633	0.253
9	601	600	0%	35.343	36.424	175.252	6.583
10	602	596	0%	35.367	37.152	225.727	11.728

Para las mediciones de *RSSI* y *LQI* durante esta prueba, se utilizó la misma configuración de la primera.

La configuración de las direcciones *IPv6* de cada nodo son las siguientes, manejadas a través de *6LoWPAN*:

Dirección IPv6 nodo 1 (Gateway): fe80::c30c:0:0:13ac

Dirección IPv6 nodo 2 (emisor): fe80::c30c:0:0:1401

Capítulo No 7. Metodología

Tabla 7-9 RSSI - LQI en prueba a 100 m con línea de vista.

Prueba	No	RSSI	LQI	Prueba	No	RSSI	LQI	Prueba	No	RSSI	LQI
1	1	- 76dBm	107	2	1	- 76dBm	105	3	1	- 76dBm	106
	2	- 74dBm	106		2	- 76dBm	104		2	- 76dBm	108
	3	- 74dBm	107		3	- 74dBm	107		3	- 74dBm	106
	4	- 77dBm	108		4	- 76dBm	108		4	- 78dBm	108
	5	- 86dBm	94		5	- 76dBm	108		5	- 76dBm	107
	6	- 76dBm	107		6	- 76dBm	107		6	- 76dBm	107
	7	- 76dBm	107		7	- 76dBm	107		7	- 78dBm	107
	8	- 78dBm	108		8	- 77dBm	108		8	- 76dBm	107
	9	- 76dBm	107		9	- 89dBm	99		9	- 70dBm	108
	10	- 75dBm	107		10	- 76dBm	108		10	- 75dBm	107
	11	- 74dBm	108		11	- 78dBm	107		11	- 76dBm	108
	12	- 77dBm	107		12	- 76dBm	108		12	- 78dBm	107
	13	- 75dBm	107		13	- 74dBm	107		13	- 78dBm	105
	14	- 76dBm	106		14	- 78dBm	107		14	- 73dBm	108
	15	- 77dBm	107		15	- 76dBm	103		15	- 75dBm	106
	16	- 79dBm	106		16	- 76dBm	107		16	- 76dBm	106
	17	- 78dBm	108		17	- 79dBm	107		17	- 79dBm	106
	18	- 76dBm	107		18	- 79dBm	107		18	- 78dBm	107
	19	- 78dBm	107		19	- 78dBm	108		19	- 75dBm	108
	20	- 76dBm	107		20	- 76dBm	108		20	- 79dBm	107
4	1	- 76dBm	108	5	1	- 76dBm	107	6	1	- 80dBm	106
	2	- 78dBm	108		2	- 77dBm	108		2	Perdid o	Perdid o
	3	- 76dBm	107		3	- 78dBm	106		3	- 84dBm	104
	4	- 75dBm	106		4	- 82dBm	107		4	Perdid o	Perdid o

Capítulo No 7. Metodología

	5	- 77dBm	107
	6	- 74dBm	105
	7	- 76dBm	108
	8	- 77dBm	107
	9	- 76dBm	108
	10	- 78dBm	107
	11	- 74dBm	106
	12	- 78dBm	107
	13	- 85dBm	97
	14	- 76dBm	108
	15	- 76dBm	108
	16	- 78dBm	108
	17	- 78dBm	107
	18	- 76dBm	107
	19	- 76dBm	107
	20	- 76dBm	108
7	1	- 87dBm	105
	2	- 84dBm	105
	3	- 78dBm	108
	4	- 83dBm	107
	5	Perdido	Perdido
	6	Perdido	Perdido
	7	- 85dBm	73
	8	- 92dBm	70
	9	- 86dBm	106
	10	Perdido	Perdido

	5	- 76dBm	108
	6	- 78dBm	108
	7	- 76dBm	107
	8	- 76dBm	108
	9	- 78dBm	107
	10	- 77dBm	108
	11	- 77dBm	108
	12	- 76dBm	108
	13	- 76dBm	107
	14	- 76dBm	108
	15	- 80dBm	107
	16	- 75dBm	106
	17	- 80dBm	108
	18	- 76dBm	106
	19	- 76dBm	108
	20	- 76dBm	108
8	1	Perdido	Perdido
	2	Perdido	Perdido
	3	- 82dBm	107
	4	- 81dBm	106
	5	- 89dBm	102
	6	- 90dBm	102
	7	- 84dBm	105
	8	Perdido	Perdido
	9	Perdido	Perdido
	10	- 80dBm	107

	5	- 87dBm	102
	6	- 80dBm	107
	7	- 88dBm	99
	8	Perdido	Perdido
	9	- 87dBm	89
	10	- 92dBm	92
	11	- 88dBm	103
	12	- 88dBm	103
	13	- 86dBm	107
	14	Perdido	Perdido
	15	Perdido	Perdido
	16	- 80dBm	106
	17	- 92dBm	94
	18	Perdido	Perdido
	19	- 85dBm	107
	20	- 93dBm	87
9	1	Perdido	Perdido
	2	- 88dBm	102
	3	- 82dBm	106
	4	- 87dBm	106
	5	- 82dBm	104
	6	Perdido	Perdido
	7	- 88dBm	102
	8	- 80dBm	108
	9	- 92dBm	91
	10	Perdido	Perdido

Capítulo No 7. Metodología

	11	- 81dBm	108
	12	Perdido	Perdido
	13	- 92dBm	92
	14	- 88dBm	98
	15	- 81dBm	105
	16	Perdido	Perdido
	17	- 88dBm	87
	18	- 87dBm	105
	19	- 84dBm	95
	20	- 91dBm	97

	11	- 83dBm	107
	12	Perdido	Perdido
	13	Perdido	Perdido
	14	- 83dBm	107
	15	- 86dBm	107
	16	- 91dBm	87
	17	- 80dBm	107
	18	- 81dBm	108
	19	- 85dBm	103
	20	Perdido	Perdido

	11	Perdido	Perdido
	12	- 84dBm	107
	13	Perdido	Perdido
	14	- 79dBm	104
	15	- 89dBm	99
	16	- 85dBm	102
	17	- 82dBm	107
	18	- 92dBm	81
	19	Perdido	Perdido
	20	- 87dBm	105

10	1	Perdido	Perdido
	2	- 77dBm	107
	3	- 83dBm	100
	4	- 90dBm	101
	5	- 84dBm	105
	6	- 89dBm	97
	7	- 81dBm	107
	8	Perdido	Perdido
	9	- 78dBm	107
	10	- 80dBm	105
	11	- 79dBm	108
	12	- 82dBm	106
	13	- 87dBm	106
	14	- 87dBm	105
	15	- 89dBm	103
	16	Perdido	Perdido

Capítulo No 7. Metodología

17	- 78dBm	107
18	Perdido	Perdido
19	- 86dBm	106
20	- 84dBm	108

7.3.5. Prueba de convergencia de la red

La primera etapa de esta prueba se desarrolló entre un nodo (139F, llamado nodo1) y el nodo *Gateway* (13AC) conectado al computador, donde se evaluó el tiempo de convergencia desde el momento en que el *Gateway* es energizado hasta el punto en que puede hacer conexión con el nodo1 posicionado a 50 metros con un salto entre ambos equipos, esto se comprobó con la herramienta ping6. Para la segunda etapa se desplegó otro nodo (13BB, llamado nodo2) a 50 metros con línea de vista hacia el nodo1, pero sin línea de vista con el *Gateway* para evaluar dos saltos en la red. Los datos obtenidos en ambas pruebas se encuentran condensados en las tablas 7-10 y 7-11, mientras que el despliegue en el terreno de prueba se aprecia en la figura 7-7.

El despliegue de los equipos se realizó en un estacionamiento de autos con algunos desniveles en el terreno visibles a simple vista donde también se encontraban a parte de los autos otros elementos fabricados con materiales variados como era el caso de columnas e concreto, láminas de metal, vegetación, rejas, entre otros que pudieron influir en la toma de datos durante el desarrollo de la prueba, cabe resaltar que se trató de mantener siempre la línea de vista entre los equipos que debían tenerla. Cabe aclarar que durante esta prueba solo se utilizó la herramienta *ping6* para evaluar los enlaces, pero en ningún momento se enviaron paquetes de un nodo a otro.

Capítulo No 7. Metodología



Figura 7-6 Despliegue para prueba de convergencia, con distancia de 50 m entre cada nodo.

Tabla 7-10 Prueba de convergencia a 50 metros con un salto entre Gateway (13AC) y nodo (139F).

<i>Número de prueba</i>	<i>Tiempo en segundos</i>
1	00:17,15
2	00:14,43
3	00:16,40
4	00:17,11
5	00:14,22
6	00:16,65
7	00:17,65
8	00:15,18
9	00:13,40
10	00:15,45

Tabla 7-11 Prueba de convergencia a 50 metros dos saltos entre Gateway (13AC), el nodo 1 (139F) y el nodo 2 (13BB).

<i>Número de prueba</i>	<i>Tiempo en minutos</i>	<i>Tiempo en segundos</i>
1	01:24,05	84,05
2	03:14,16	194,16
3	01:38,46	98,46
4	03:12,61	192,61
5	03:12,91	192,91
6	03:22,81	202,81
7	03:14,07	194,07
8	03:31,76	211,76
9	03:56,15	236,15
10	03:52,55	232,55

Capítulo No 7. Metodología

7.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

El análisis de los datos obtenidos se realizó aplicando el test de *Kolmogorov-Smirnov* o *K-S* y el de *Kruskal-Wallis*.

7.4.1. Análisis de los porcentajes de paquetes perdidos

En la Figura 7-8 se condensan los datos obtenidos en las pruebas de campo, los grupos 1-2-3 y 4 corresponden a las pruebas realizadas a 10 m, 10 m con obstáculos, 50 m y 100 m respectivamente.

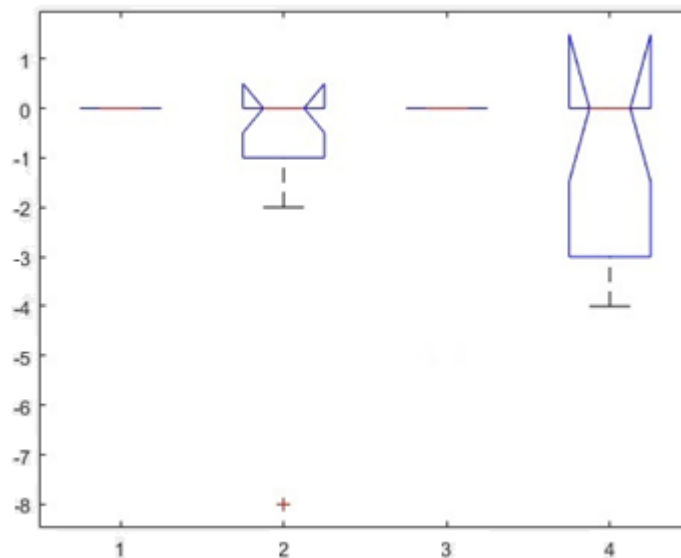


Figura 7-7 Paquetes perdidos en pruebas de campo de radio enlace.

Tabla 7-12 Datos suministrados por el test K-S para paquetes perdidos.

#	Distance	Q1(25%)	Q2(50% median)	Q3(75%)	IQR	Minimum value	Maximum value	Upper atypical values	Lower atypical values
1	los_10	0	0	0	0	0	0	-	-
2	wos_10	-1	0	0	1	-8	0	-	-8
3	los_50	0	0	0	0	0	0	-	-
4	los_100	-3	0	0	3	-4	0	-	-

Capítulo No 7. Metodología

La Figura 7 muestra que en la prueba de 10 metros con obstáculos hay una pérdida del 20%; en la de 100 metros la pérdida es del 40% y se aprecia la mayor dispersión de los datos. Por otro lado, a 10 m y 50 m, no hay pérdida de paquetes. Por lo tanto, el comportamiento de los equipos a una distancia de 50 m con línea de vista es similar a la distancia de 10 m con línea de vista.

7.4.2. Análisis de los datos de RSSI

Como se mencionó anteriormente, en las pruebas de *RSSI* se obtendrían 200 paquetes para cada distancia utilizada en intervalos de 10 pruebas con duración de 10 min. Debido a que en la prueba de *RSSI* a una distancia de 100 m se perdieron 28 paquetes solo se obtuvo un total de 172 paquetes. Por lo tanto, para introducir los datos en Matlab® se igualó la cantidad de paquetes de las otras pruebas a 172 obteniendo como resultado la figura 7-9.

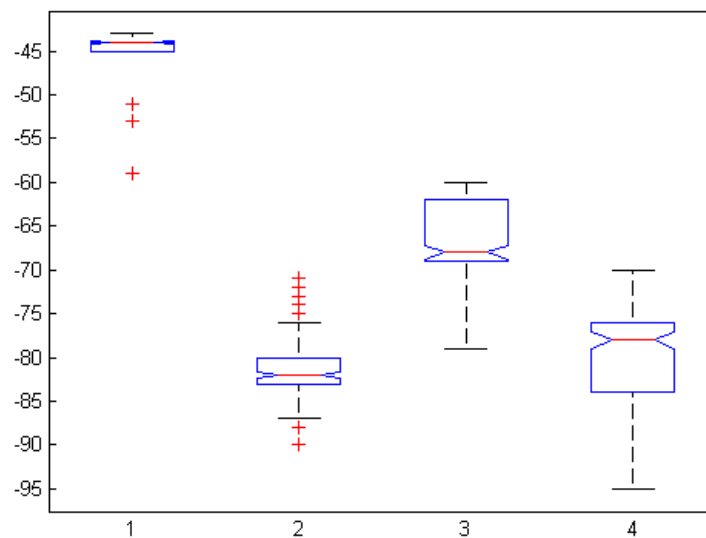


Figura 7-8 RSSI en pruebas de campo de radio enlace.

Capítulo No 7. Metodología

Tabla 7-13 Datos suministrados por el test K-S para RSSI.

#	Distancia	Q1(25%)	Q2(50% mediana)	Q3(75%)	IQ R	Valor mínimo	Valor máximo	Valores atípicos superiores	Valores atípicos inferiores
1	los_10	-45	-44	-44	1	-45	-43	-	-51; -53; -59
2	wos_10	-83	-82	-80	3	-87	-76	-71; -72; -73; -74; -75	-88; -90
3	los_50	-69	-68	-62	7	-79	-60	-	-
4	los_100	-84	-78	-76	8	-95	-70	-	-

En esta prueba se observa que las medianas de cada grupo son significativamente diferentes entre ellas debido a que no hay solapamiento de las muescas, aunque se observa cierta similitud entre el grupo 2 y 4 con valores cercanos al -100 (indicando señal pésima). El mejor desempeño se presenta en la prueba a 10 m con línea de vista y a 50 m con línea de vista, con valores que oscilan entre los -45 y los -76 presentando pocos valores atípicos respecto al tamaño de las muestras (172), para el caso del grupo 1. La mayor cantidad de valores atípicos se aprecian en el grupo 2 (10 m con obstáculos) cuando los equipos fueron probados con obstáculos y sin línea de vista, a pesar de esto presentaron mejores resultados que el grupo 4 (100 m).

7.4.3. Análisis de los datos de LQI

Los valores de *LQI* se obtuvieron en conjunto con los de *RSSI* por tal motivo también se tuvo que normalizar los valores de *LQI* a 172 debido a la pérdida de paquetes que se presentó en las pruebas a la distancia de 100 m. Ver figura 7-10.

Capítulo No 7. Metodología

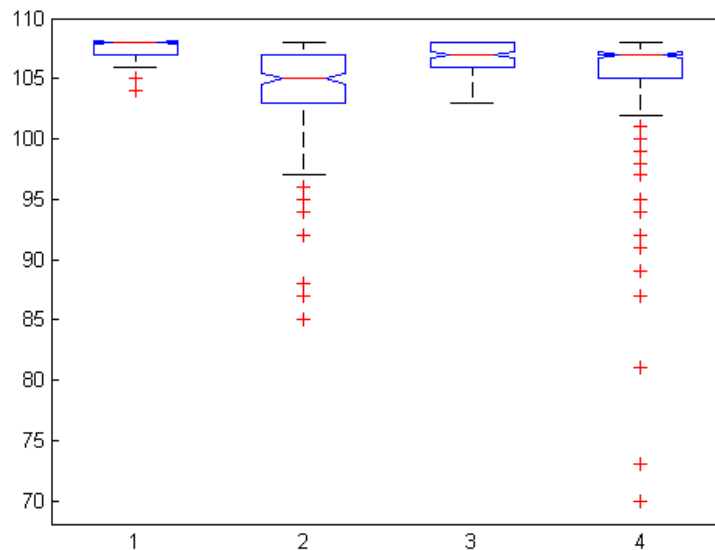


Figura 7-9 LQI en pruebas de campo de radio enlace.

Tabla 7-14 Datos suministrados por el test K-S para LQI.

	Distancia	Q1(25%)	Q2(50% mediana)	Q3(75%)	IQR	Valor mínimo	Valor máximo	Valores atípicos superiores	Valores atípicos inferiores
1	los_10	107	108	108	1	106	108	105;105;105; 105;104;	-
2	wos_10	103	105	107	4	97	108	96;96;96; 95;94;94; 92;88;87; 85;	-
3	los_50	106	107	108	2	103	108	-	-
4	los_100	105	107	107	2	102	108	101;100;99;99; 99;98;97;97;97; 95;94;94;92;92; 91;89;87;87;87; 81;73;70	-

Las medianas de cada grupo se encuentran dentro del 5% de significación, y en general se aprecia lo mencionado por (Mian et al., 2016) y (Blumenthal et al., 2007), que los valores de *LQI* no se ven afectados drásticamente por la distancia, reflexiones de objetos, campos electromagnéticos, difracción y refracción. Los valores oscilan cercanos al 110 (Indicador de una señal con calidad máxima) pero se aprecian valores atípicos en los

Capítulo No 7. Metodología

grupos 1-2 y 4, con mayor cantidad en el 2 con una representación del 5,81% y el 4 con un 12,75% del total de los datos, muy seguramente por los obstáculos en el grupo 2 y por el posible desnivel presente en la zona de experimentación en la prueba a 100 m perteneciente al grupo 4.

7.4.4. Análisis de los datos de Convergencia

En esta prueba el formato utilizado para los datos fue de segundos, el primer grupo pertenece a un (1) salto (13ac – 139f), el segundo grupo a dos saltos (de 13bb a 139f y luego a 13ac). Ver figura 7-11.

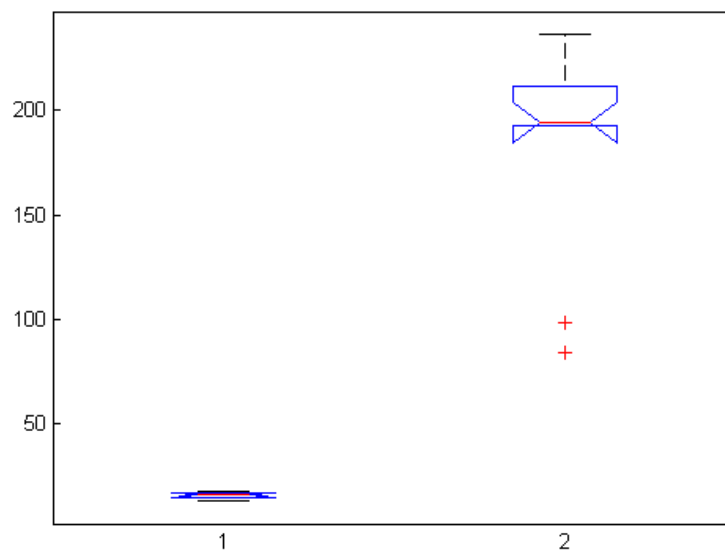


Figura 7-10 Convergencia en pruebas de campo de radio enlace.

Tabla 7-15 Datos suministrados por el test K-S para Convergencia.

	Saltos	Q1(25%))	Q2(50% mediana)	Q3(75%)	IQR	Valor mínimo	Valor máxim o	Valores atípicos superiore s	Valores atípicos inferiores
1	1 salto	14.43	15.925	17.11	2,68	13.4	17.65	-	-
2	2 saltos	192.61	194.115	211.76	19,1 5	192.61	236.15	-	98.46;84.05

Capítulo No 7. Metodología

En la figura 7-11 se observa que los grupos de datos poseen diferencias bastante notables, en el grupo 1, los rangos van desde los 13.4 segundos a los 17.65 segundos, mientras que en el grupo 2 los rangos van desde los 192.61 segundos a los 236.15 segundos, variando notablemente respecto a la prueba con un solo salto de acuerdo a lo manifestado en la literatura. Esto se debe a factores propios del terreno donde se realizaron las pruebas, ya que existían desniveles en la superficie a pesar que se trató de mantener la línea de vista lo más despejada posible había cierta interferencia por parte de la vegetación y otras estructuras. Aparte, se utilizaron los parámetros de configuración de RPL que trae por defecto *Contiki* para I_{min} en 12 y la constante de redundancia K en 10 influyentes en los tiempos de respuesta de los equipos para mejorar la convergencia de la red. Estos valores deben ser diferentes para cada aplicación debido a que las redes presentan características diferentes de operación, para calcularlos es necesario apoyarse en softwares especiales como Matlab®, así lo demostraron (ArunKumar & Alagumeenaakshi, 2014).

7.4.5. Cálculo de cobertura entre equipos y modelo de despliegue de la red

Aplicando la ecuación (2) anteriormente relacionada, se obtienen 25 nodos para una red de dos capas, 49 para tres capas y 81 para cuatro capas. En cada cálculo uno de los nodos pertenece al *Gateway* y el resto corresponde a los encargados de la monitorización.

$$C = 2$$

$$N = (2C + 1)^2 = (2(2) + 1)^2 = 25$$

$$C = 3$$

$$N = (2C + 1)^2 = (2(3) + 1)^2 = 49$$

$$C = 4$$

$$N = (2C + 1)^2 = (2(4) + 1)^2 = 81$$

Capítulo No 7. Metodología

Partiendo de este dato se calcula el r_{sense} utilizando una hectárea como área para la siembra, siendo R el radio de la circunferencia alrededor del terreno como se aprecia en la figura 7-12 y “n” como la cantidad de nodos calculados para los despliegues a diferentes capas.

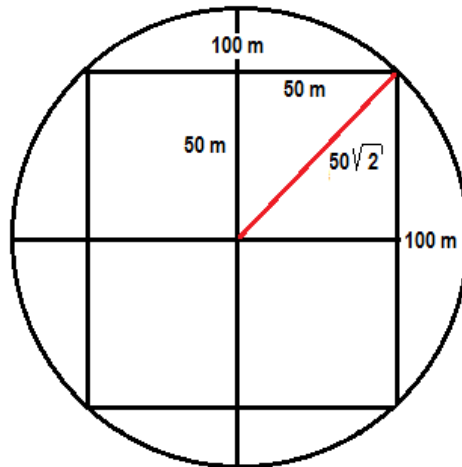


Figura 7-11 Aplicación de plantilla para calcular el r_{sense} en una hectárea.

Fuente: (Poe & Schmitt, 2009)

$$n = \#nodos$$

Evaluación de la cobertura con dos capas 25 nodos:

$$r_{sense(m)} = \sqrt{\frac{\pi R^2}{n}}$$

$$r_{sense(m)} = \sqrt{\frac{\pi(50\sqrt{2})^2}{25}} = \sqrt{\frac{\pi}{25}} * 50\sqrt{2} = 25.066 \text{ m}$$

$$25.066 \text{ m} \leq 150 \text{ m (rango máximo de cobertura CC2420)}$$

Evaluación de la cobertura con tres capas 49 nodos

Capítulo No 7. Metodología

$$r_{sense(m)} = \sqrt{\frac{\pi(50\sqrt{2})^2}{49}} = \sqrt{\frac{\pi}{49}} * 50\sqrt{2} = 17.9 \text{ m}$$

$$17.9\text{m} \leq 150 \text{ m}(\text{rango máximo de cobertura CC2420})$$

Evaluación de la cobertura con cuatro capas 81 nodos

$$r_{sense(m)} = \sqrt{\frac{\pi(50\sqrt{2})^2}{81}} = \sqrt{\frac{\pi}{81}} * 50\sqrt{2} = 13.9 \text{ m}$$

$$13.9\text{m} \leq 150 \text{ m}(\text{rango máximo de cobertura CC2420})$$

El r_{sense} utilizando 25, 49 y 81 nodos se encuentra dentro del rango de 150 m de cobertura máxima permitida por el *transceptor CC2420* utilizado por la mota *ZI* (Texas Instruments, 2017) . También están en el rango de 10 y 50 m distancias utilizadas en las pruebas de campo, las cuales arrojaron buenos resultados en las métricas analizadas anteriormente. Los nodos distribuidos en forma de cuadrícula se encuentran a distancias de 25, 18 y 14 m entre sí manteniendo los parámetros de comunicación idénticos para cualquier punto de la red.

Para los cultivos de yuca se recomienda una distancia de 0,80 m entre plantas (Infoagro, 2017), entonces, se sugiere utilizar distancias cortas entre nodos para disminuir la cantidad de plantas que pueden quedar fuera del foco de monitorización que se presentaría si las distancias entre nodos fuesen mayores, obteniendo de esta forma mejores resultados. Es de destacar que a mayor cantidad de nodos aumenta la densidad de la red, y con ello el costo de implementación (adquisición de más equipos, consume energético y gastos de instalación, entre otros), factores que deben ser analizados por cada agricultor.

La nomenclatura utilizada para los despliegues es $N\#C\#$, donde $N\#$ indica el

Capítulo No 7. Metodología

número del nodo y **C#** el número de la capa a la que pertenece, a excepción del **N0** que representa al *Gateway* como lo sugiere (Caicedo-Ortiz & Acosta-Coll, 2014). Cada nodo está equipado con un sensor *SHT11* capaz de capturar la temperatura y humedad del suelo, variables influyentes en el desarrollo óptimo de la yuca. Con ayuda del transceptor de radio *CC2420* se envían los valores obtenidos a través de la red hasta el nodo *Gateway* o en este caso *RPL-DODAG* donde son almacenados en una base de datos, quedando a disposición del agricultor.

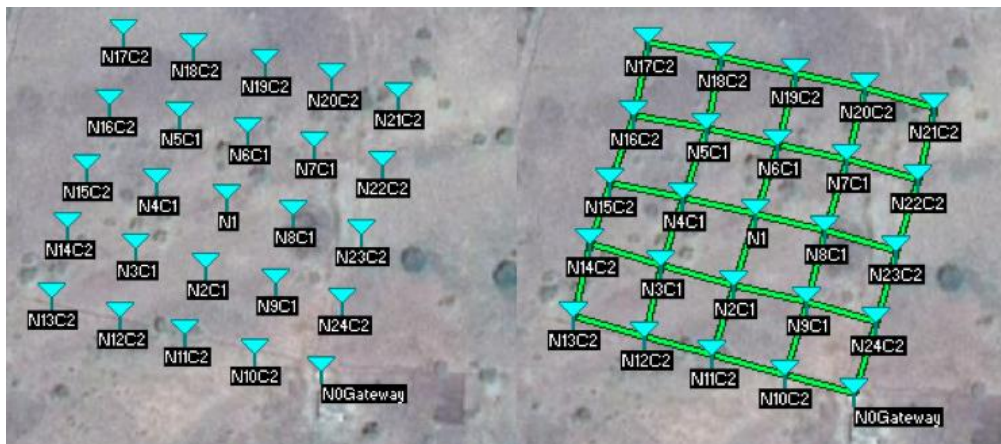


Figura 7-12 Modelo de despliegue de la red en terreno de Manatí Atlántico.

7.5 PRESUPUESTO DE ENLACE

Los equipos utilizados como emisor y receptor pertenecen a la empresa *Zolertia*, ambos con la misma referencia, sus características fueron mencionadas anteriormente. Las antenas de los equipos poseen una ganancia de 5dbi y se encuentran conectadas a los nodos a través de conectores *RPSMA*, las pérdidas a evaluar son de un (1) db y las antenas se encuentran a 1,6 m sobre el suelo (puede haber variaciones por la topografía del terreno), de esta forma se estima que los parámetros de comunicación serán los mismos para todos los equipos.

Se calcula el presupuesto de enlace:

$$+Potencia\ de\ Tx(0\ dbm)$$

Capítulo No 7. Metodología

$$\begin{array}{r}
 +\text{Ganancia de la antena Tx (5 db)} \\
 -\text{Perdidas en los cables del Tx(1 db)} \\
 +\text{Ganancia de la antena Rx (5dbi)} \\
 -\text{Perdidas en los cables del Rx (1 db)} \\
 \hline
 \text{Ganancia total (8 db)}
 \end{array}$$

Se calcula la pérdida en el espacio libre o trayecto para las tres distancias obtenidas 25, 18, 14 m con la ecuación (5):

$$L_{fsi} = 40 + 20\text{Log}(d) \quad (5)$$

Para 25 m:

$$L_{fsi} = 40 + 20\text{Log}(25)$$

$$L_{fsi} = 67.9 \text{ db} \approx 68 \text{ db}$$

Para 18 m:

$$L_{fsi} = 40 + 20\text{Log}(18)$$

$$L_{fsi} = 65 \text{ db}$$

Para 14 m:

$$L_{fsi} = 40 + 20\text{Log}(14)$$

$$L_{fsi} = 62.9 \text{ db} \approx 63 \text{ db}$$

Con la ganancia total y las pérdidas en el espacio libre, se procede a calcular el nivel de señal que llegará al receptor:

Cálculo del nivel de la señal en Rx para 25 m:

$$\text{Ganancia total (8 db)}$$

Capítulo No 7. Metodología

$$\frac{-\text{Perdidas en el espacio libre (68 db)}}{\text{Nivel de la señal en Rx}(-60 \text{ dBm})}$$

Cálculo del margen de tolerancia de la señal para 25 m:

Margen de tolerancia de la señal = Nivel de la señal que llega a Rx – Sensibilidad del Rx

$$\text{Margen de tolerancia de la señal} = -60 \text{ dBm} - (-95 \text{ dBm}) = 35\text{dB}$$

Cálculo del nivel de la señal en Rx para 18 m:

Ganancia total (8 db)

$$\frac{-\text{Perdidas en el espacio libre (65 db)}}{\text{Nivel de la señal en Rx}(-57 \text{ dBm})}$$

Cálculo del margen de tolerancia de la señal para 18 m:

Margen de tolerancia de la señal = Nivel de la señal que llega a Rx – Sensibilidad del Rx

$$\text{Margen de tolerancia de la señal} = -57 \text{ dBm} - (-95 \text{ dBm}) = 38\text{dB}$$

Cálculo del nivel de la señal en Rx para 14 m:

Ganancia total (8 db)

$$\frac{-\text{Perdidas en el espacio libre (63 db)}}{\text{Nivel de la señal en Rx}(-55 \text{ dBm})}$$

Cálculo del margen de tolerancia de la señal para 14 m:

Margen de tolerancia de la señal = Nivel de la señal que llega a Rx – Sensibilidad del Rx

$$\text{Margen de tolerancia de la señal} = -55 \text{ dBm} - (-95 \text{ dBm}) = 40\text{dB}$$

Capítulo No 7. Metodología

Tabla 7-16 Datos de cada presupuesto de enlace.

	25 m	18 m	14 m
Ganancia total	8 db	8 db	8 db
Pérdida en el espacio libre (L_{fsi})	68 db	65 db	63 db
Nivel de señal Rx	-60 dBm	-57 dBm	-55 dBm
Margen de tolerancia de la señal	35 dB	38 dB	40 dB

En la tabla 7-16 se aprecia que para las tres distancias utilizadas los valores de sensibilidad son mayores a los del receptor (-95 dBm), indicando que son niveles de señal suficiente para que exista comunicación entre los equipos. De acuerdo a (Zennaro, Bagula, Gascon, & Noveleta, 2010), con un margen de tolerancia superior a los 10 dB es posible obtener rendimientos del 70% al 100% en los enlaces, con valores inferiores los enlaces presentarían problemas o no serían posibles. Los márgenes de tolerancia obtenidos claramente son superiores a los 10 dB por consiguiente se consideran óptimos para las distancias planteadas, igualmente se aclara que en estos cálculos no se tuvieron en cuenta aspectos como la vegetación, el clima y otros factores que de alguna forma añaden pérdidas a los enlaces.

La evaluación de estos presupuestos de enlace se verificó con el software *Radio Mobile* en su versión 11.6.5 simulador que permite realizar pruebas de enlaces de radio microondas que operan en el rango de 20 MHz a 20 GHz basado en el modelo de propagación *ITS (Irregular Terrain Model)* apoyándose en cartografía y mapas satelitales (Radio-Mobile, 2017). Con *Radio Mobile* es posible comprobar si existe línea de vista entre emisor y receptor teniendo en cuenta las pérdidas por obstáculos, trayecto o conexiones entre los equipos dado que el software utiliza un modelo de elevación digital del terreno. A continuación, se presentan las configuraciones realizadas en el software.

Capítulo No 7. Metodología

La frecuencia de operación de la red para cada enlace se configura en el menú *Networks Properties* pestaña *Parameters* con un rango de 2400 MHz a 2485 MHz, adicionalmente se configura el tipo de clima a Ecuatorial de acuerdo a las coordenadas de la región. Por otra parte, se pueden adicionar pérdidas por obstáculos como edificios o por vegetación en la sección *Additional Loss*, parámetro que inicialmente se deja en cero (ver figura 7-14).

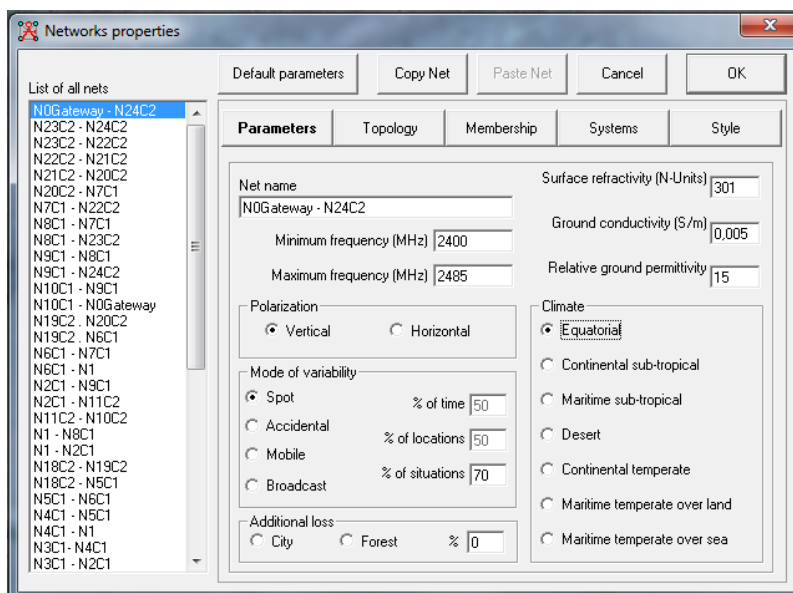


Figura 7-13 Configuración de enlaces en Radio Mobile (Parameters).

Las configuraciones de transmisión, recepción, sensibilidad de las antenas y pérdidas en los cables y conectores se realizan en la pestaña *Systems* de acuerdo a la hoja de datos del fabricante, ver figura 7-15.

Capítulo No 7. Metodología

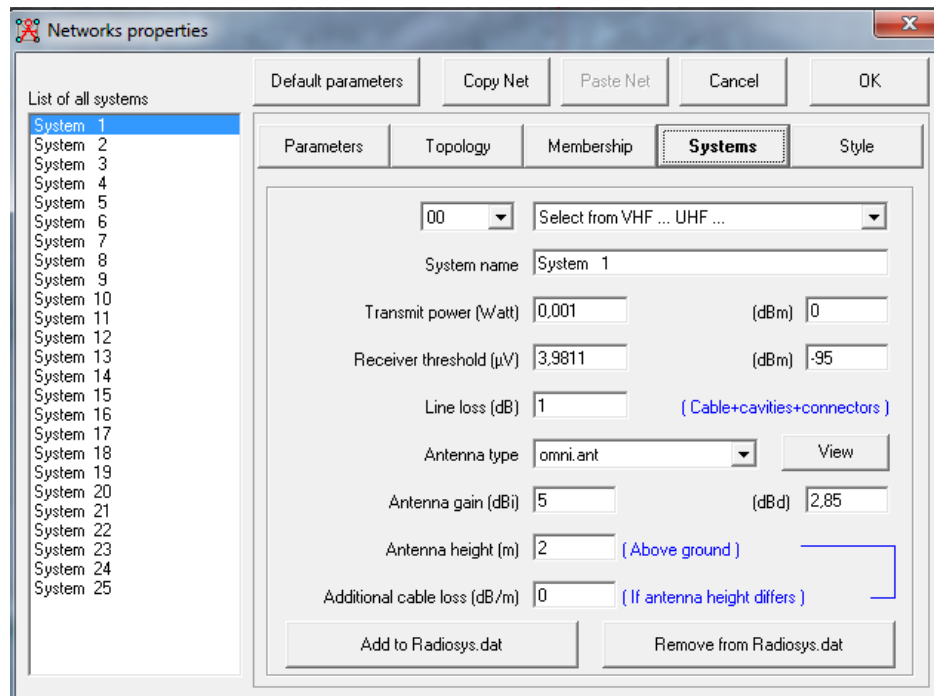


Figura 7-14 Configuración de enlace en Radio Mobile (Systems).

Los enlaces establecidos entre un nodo y sus vecinos se evaluaron a través del menú *Radio Link*, donde se aprecia que la distancia entre el **N0Gateway** y el **N24C2** es de 30 m o 0,03Km superior a la calculada para los tres enlaces planteados, la altura de las antenas se encuentra a 1,6 m y se obtuvo un margen de tolerancia de **31,6 db**, aparte del *Rx relative* que debe ser superior a 10 dB, el *Worst Fresnel* que indica *Radio Mobile* debe ser mayor o igual al menos a 0,6F1 (Es decir que el *clearance* debe ser mayor o igual a 0,6 el radio de la primera zona de fresnel por teoría). Como en la figura 7-16 es 1,6 F1 entonces el enlace es estable y satisfactorio para que exista una óptima comunicación entre emisor y receptor cumpliendo lo planteado por (Zennaro et al., 2010)(Al Daz-Rosas, Hernández-Constante, & Cedano-Ol, 2016). Solo se realizó la prueba con estos dos nodos debido a que los parámetros del resto de nodos y también las distancias entre ellos es la misma, esto indica que se mantienen los mismos resultados para cada enlace.

Capítulo No 7. Metodología

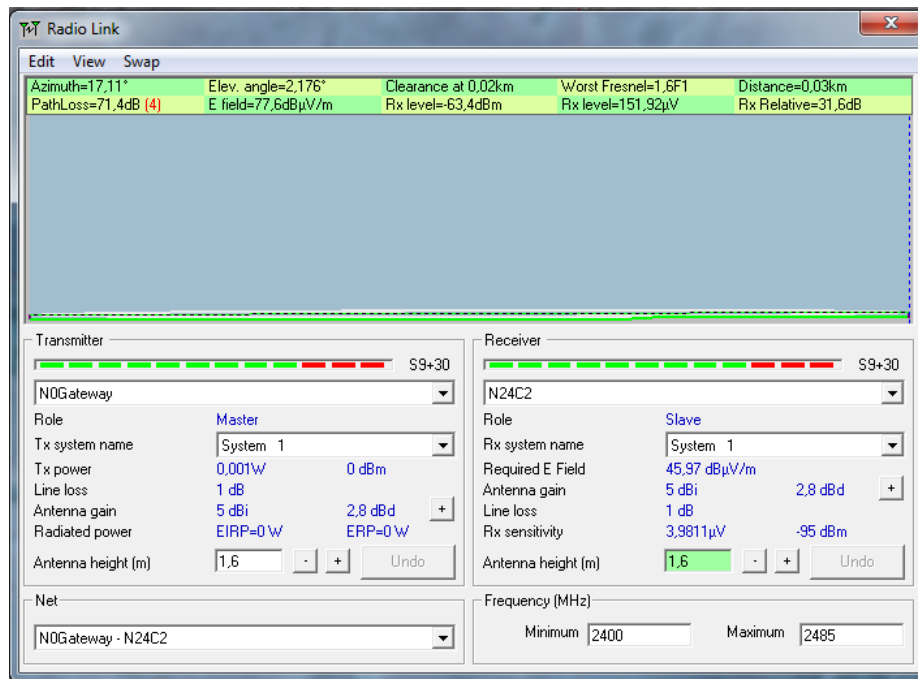


Figura 7-15 Evaluación del enlace entre N0Gateway y N24C2.

En la segunda prueba se adicionaron pérdidas por vegetación en un 10%, como se evidencia en la figura 7-17, dado que se trata de un terreno de cultivo donde los equipos se encontrarán rodeados de muchas plantas de yuca, se analizó el comportamiento del enlace y los resultados obtenidos aún siguen siendo óptimos para que se pueda mantener un enlace entre dos equipos, se observa un margen de tolerancia respecto a la sensibilidad de **27,9 db** superior a los **10 db**, ver figura 7-18.

Capítulo No 7. Metodología

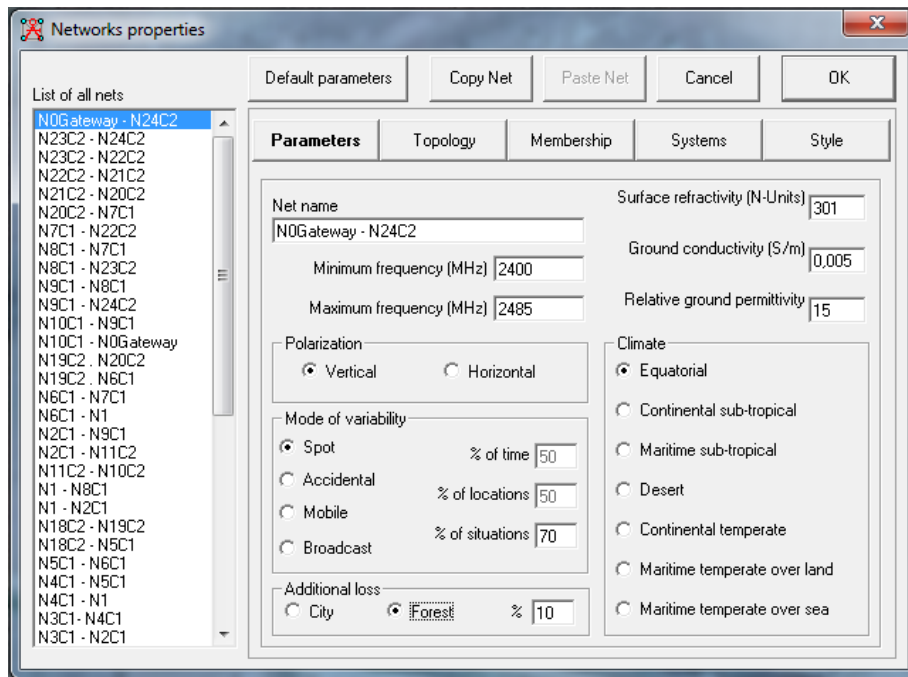


Figura 7-16 Configuración de Radio Mobile adicionando 10% de pérdidas por vegetación.

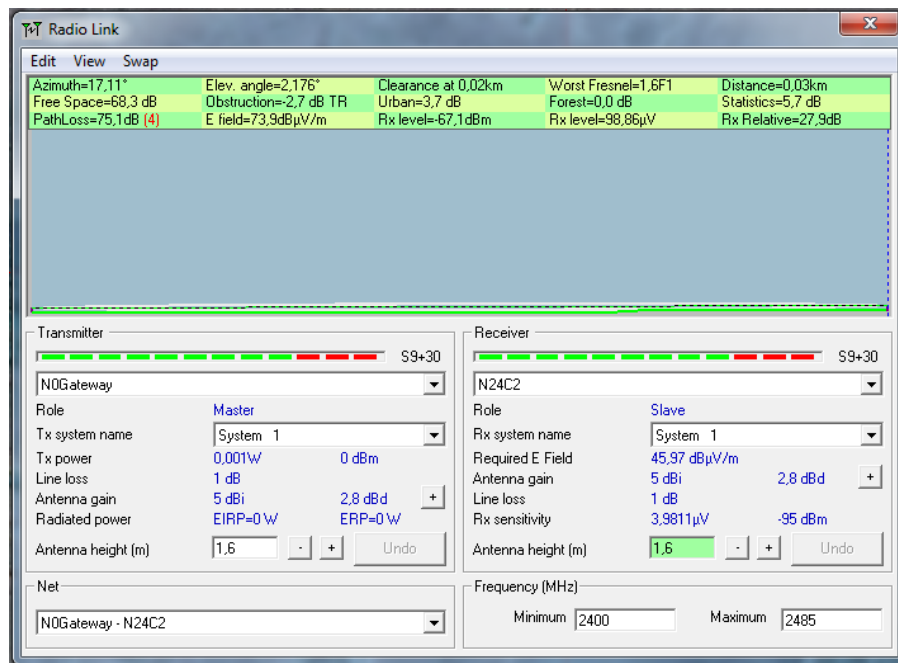


Figura 7-17 Evaluación del enlace con el 10% de pérdidas por vegetación.

Para el enlace establecido entre N0Gateway – N24C2 se obtuvieron los siguientes resultados:

Sin vegetación, distancia entre equipos de 30 m, altura de antenas a 1,6m:

Capítulo No 7. Metodología

- *RX Relative: 31,6 db.*

Con 10% de pérdida por vegetación, distancia entre equipos de 30 m, altura de antenas a 1,6m:

- *RX Relative: 27,9 db.*

Con 30 m entre equipos el enlace se mantiene totalmente estable con un margen de tolerancia respecto a la sensibilidad de las antenas bastante superior al nivel mínimo de 10 db, por consiguiente si los enlaces se encontraran a las distancias calculadas de 25, 18 y 14 m, las condiciones de los enlaces fuera bastante similar o mejores debido a que existiría mayor cercanía entre emisor y receptor y el equipo incluso se podría configurar para utilizar menos potencia de transmisión disminuyendo un poco el consumo energético y así prolongar la duración del tiempo de actividad útil en la red.

Capítulo No 7. Metodología

7.6 DATOS OBTENIDOS EN CULTIVO DE YUCA.

Se realizaron pruebas en cultivo de yuca en el Municipio de Manatí Atlántico con las motas *Z1* de *Zolertia* y el sensor de temperatura y humedad del suelo *SHT11*, ver figura 7-19.



Figura 7-18 Equipos en campo con cultivo de yuca.

Las pruebas se realizaron a la 1:00 pm hora colombiana, con valores de temperatura que oscilaban entre los 40° a los 45°C, mientras que los valores de humedad del suelo se

Capítulo No 7. Metodología

mantuvieron entre 27,96 y 40%. En la tabla 7-17 se condensan los valores capturados con los equipos operando en terrenos y a la intemperie demostrando su funcionalidad.

Tabla 7-17 Valores obtenidos en prueba de campo.

<i>Temperatura del suelo</i>	<i>Humedad del suelo</i>
43,22 °C	33,23 %
42,14 °C	33,87 %
42,90 °C	33,90 %
43,24 °C	31,34 %
45,43 °C	36,43 %
43,19 °C	35,38 %
42,90 °C	27,96 %
44,65 °C	35,14 %
43,89 °C	34,67 %
41,63 °C	36,14 %
42,47 °C	35,47 %
43,54 °C	29,37 %
43,56 °C	34,15 %
42,89 °C	33,76 %
42,73 °C	32,99 %
42,94 °C	35,65 %
43,56 °C	35,68 %
44,12 °C	39,87 %
43,98 °C	39,01 %
44,17 °C	38,76 %

7.7 ALMACENAMIENTO Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS

Con el modelo de red definido y los equipos probados en campo, se desarrolló una aplicación web utilizando la arquitectura cliente servidor *XAMPP*, donde los datos se encuentran alojados en un servidor MySQL el cual utiliza PHP como intermediario para su conexión con la interfaz gráfica la cual se construyó con el *software* libre *CodeIgniter framework* basado en un patrón de desarrollo MVC (Modelo Vista Controlador) donde se separan los datos, la lógica de la aplicación y la interfaz de usuario. El nombre que se le asignó es *SIMCA* abreviatura de Sistema de Información y Monitorización de Cultivos

Capítulo No 7. Metodología

Agrícolas, la URL para acceder es <http://simca.rcmsystems.org/>. El sistema cuenta con una interfaz para verificación de usuario como se aprecia en la figura 7-20.

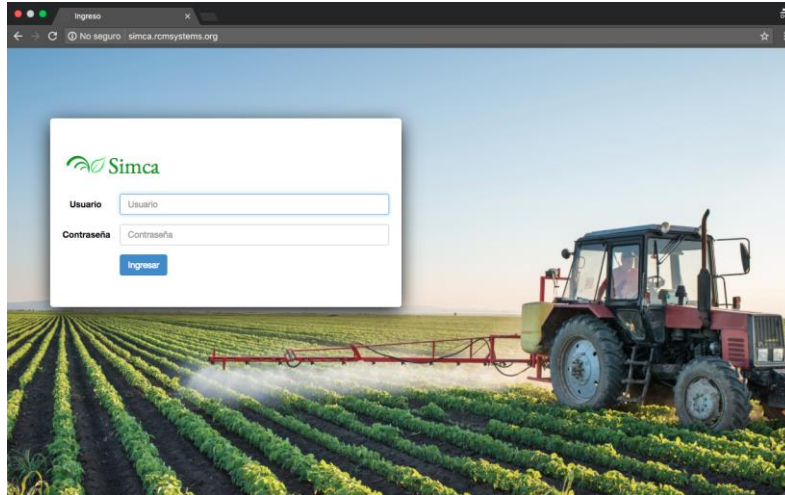


Figura 7-19 Interfaz de acceso SIMCA.

Al tener acceso a la aplicación web el usuario cuenta con un menú al lado izquierdo de la página con las opciones Gráficas, Datos y la opción para cerrar la sesión. En la sección de gráficas se puede seleccionar entre “últimos datos o datos en tiempo real”. Al escoger últimos datos el usuario puede visualizar en tres gráficas diferentes los datos previamente almacenados de la temperatura del suelo y humedad del suelo vs la fecha cuando se obtuvieron los datos. Las dos primeras son gráficas de líneas mientras que la tercera es de barras para una mejor comprensión y análisis de los datos. Ver figuras 7-21 y 7-22.

Capítulo No 7. Metodología

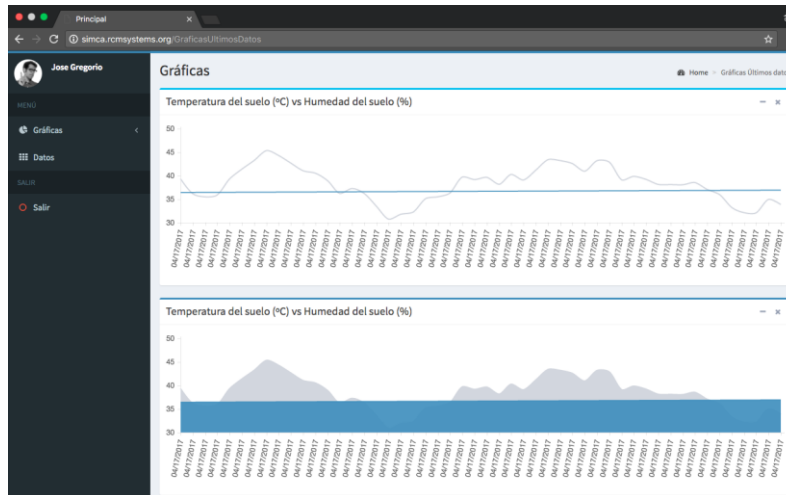


Figura 7-20 Visualización de las gráficas en SIMCA (I).

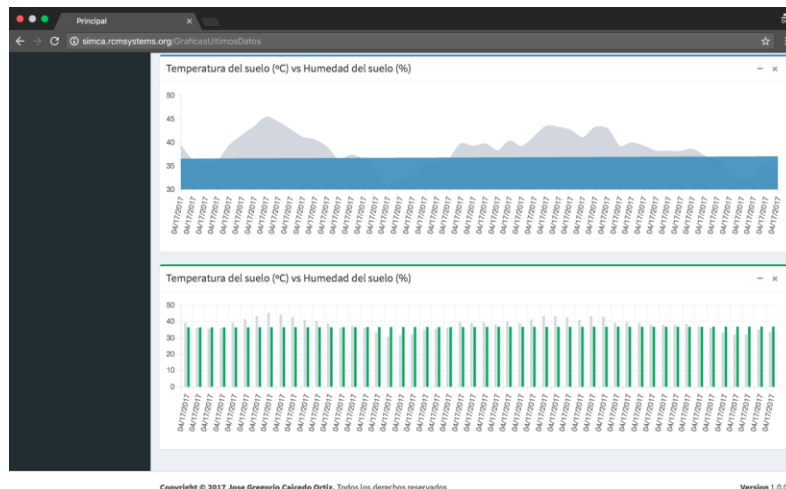


Figura 7-21 Visualización de las gráficas en SIMCA (II).

Quando se escoge la opción “datos en tiempo real” se pueden visualizar dos gráficas, la primera de temperatura del suelo y la segunda de humedad del suelo, ambas con la opción de activar o desactivar el muestreo de los datos para controlar la visualización de estos cuando el tiempo de adquisición es bastante corto y el sistema captura información rápidamente (esto se encuentra sujeto al tiempo de adquisición programado en las motas). Ver figura 7-23.

Capítulo No 7. Metodología

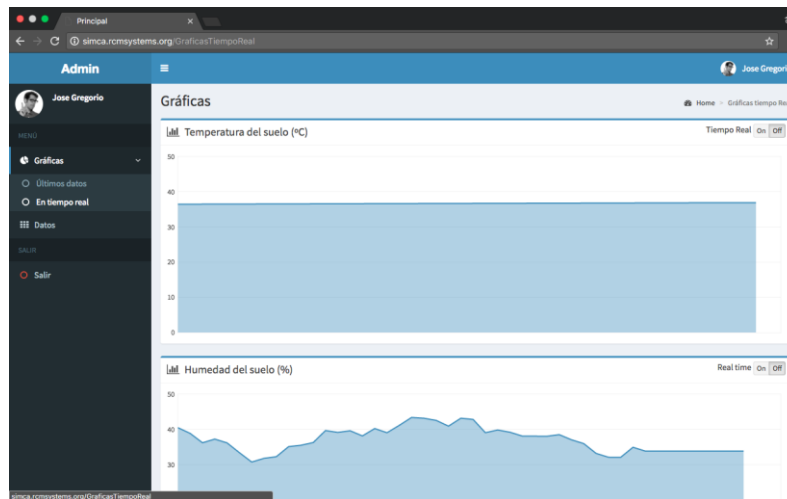


Figura 7-22 Visualización de los datos en tiempo real.

En la opción “Datos” se aprecia una matriz de los datos pertenecientes a las motas en el siguiente orden:

No: hace referencia al número que ocupa el dato en la lista.

Fecha: corresponde a la fecha de envío en el formato mes/día/año.

Hora: tiempo exacto en que se envía la información.

Id Mota: identificador de la mota.

Temperatura del suelo: muestra el valor de la temperatura del suelo en °C. Cuando el valor supera los 38 °C la celda se coloca de color rojo indicando que se superó el umbral de temperatura para el desarrollo normal del tubérculo, por el contrario, si el valor se encuentra por debajo de los 16 °C la celda se tornará color azul revelando que se encuentra por debajo del rango de desarrollo normal.

Humedad del suelo: muestra el valor de la humedad del suelo en %. Cuando el valor supera el 40% la celda se coloca de color rojo, por el contrario, si el valor se encuentra por debajo del 27% la celda se tornará color azul. Cabe aclarar que se definió

Capítulo No 7. Metodología

este rango basado en los valores capturados en las pruebas de campo, debido a que no se encontró en la literatura un rango óptimo para esta variable en cultivos de yuca.

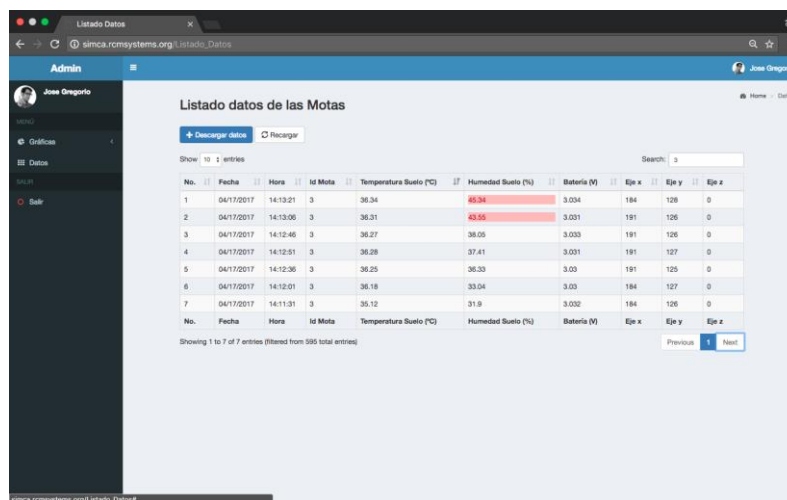
Batería: arroja el nivel de carga de la batería en voltios.

Eje x: muestra el valor del acelerómetro en el eje x (así se puede percibir si la mota se encuentra en la posición en la que se instaló).

Eje y: muestra el valor del acelerómetro en el eje y (así se puede percibir si la mota se encuentra en la posición en la que se instaló).

Eje z: muestra el valor del acelerómetro en el eje z (así se puede percibir si la mota se encuentra en la posición en la que se instaló).

También se encuentra disponible la opción de filtrado de información por mota digitando el Id de la mota en el cuadro de búsqueda “*search*”. Por último, se le facilita al usuario la opción de descargar los datos en un archivo con formato *Excel*. Ver figura 7-24 y 7-25.



No.	Fecha	Hora	Id Mota	Temperatura Suelo (°C)	Humedad Suelo (%)	Batería (V)	Eje x	Eje y	Eje z
1	04/17/2017	14:13:21	3	36.34	45.34	3.004	184	128	0
2	04/17/2017	14:13:06	3	36.31	43.55	3.031	191	126	0
3	04/17/2017	14:12:46	3	36.27	38.05	3.033	191	126	0
4	04/17/2017	14:12:51	3	36.28	37.41	3.031	191	127	0
5	04/17/2017	14:12:36	3	36.25	36.33	3.03	191	125	0
6	04/17/2017	14:12:01	3	36.18	33.04	3.03	184	127	0
7	04/17/2017	14:11:31	3	35.12	31.9	3.032	184	126	0

Figura 7-23 Información de los datos capturados por mota.

Capítulo No 7. Metodología

id	humedad_suelo	id_usuario	temperatura	látex	fecha	hora	eje_x	eje_y
1	2.2868	2	3.033	04/17/2017	14:11:21	184	127	255
2	3.3159	2	3.033	04/17/2017	14:11:26	184	127	255
3	3.3159	2	3.032	04/17/2017	14:11:31	184	126	0
4	3.3255	2	3.032	04/17/2017	14:11:36	184	129	255
5	3.3511	2	3.029	04/17/2017	14:11:41	184	127	0
6	3.3548	2	3.033	04/17/2017	14:11:46	184	128	0
7	3.3625	2	3.033	04/17/2017	14:11:51	184	127	0
8	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:11:56	184	128	0
9	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:12:01	184	127	0
10	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:12:06	184	126	0
11	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:12:11	184	125	0
12	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:12:16	184	126	0
13	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:12:21	184	127	0
14	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:12:26	184	126	0
15	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:12:31	184	130	255
16	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:12:36	191	125	0
17	3.3622	2	3.032	04/17/2017	14:12:41	191	127	0
18	3.3622	2	3.032	04/17/2017	14:12:46	191	126	0
19	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:12:51	191	127	0
20	3.3622	2	3.032	04/17/2017	14:12:56	191	126	0
21	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:13:01	191	127	0
22	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:13:06	191	126	0
23	3.3622	2	3.032	04/17/2017	14:13:11	191	126	0
24	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:13:16	191	126	0
25	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:13:21	184	128	0
26	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:13:26	191	129	255
27	3.3622	2	3.032	04/17/2017	14:13:31	191	126	1
28	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:13:36	191	126	0
29	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:13:41	191	127	0
30	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:13:46	191	125	0
31	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:13:51	191	126	0
32	3.3622	2	3.032	04/17/2017	14:13:56	191	126	0
33	3.3622	2	3.031	04/17/2017	14:14:01	191	125	255
34	3.3622	2	3.032	04/17/2017	14:14:06	191	126	0
35	3.3622	2	3.032	04/17/2017	14:14:11	191	126	0

Figura 7-24 Datos descargados de SIMCA.

Con los datos descargados es posible realizar estudios más detallados del comportamiento del cultivo de acuerdo a la incidencia que tienen las variables en estudio, la temporada del año en la cual se desarrolla y las etapas fenológicas del mismo que son: emisión de raíces, formación de brotes superficiales, formación de hojas, crecimiento del tallo y crecimiento de las raíces (Burgos, Argüello, Prause, & Cenóz, 2013). Por otra parte, si se adicionan las técnicas de minería de datos se puede extraer información que a simple vista no es posible detectar para utilizarla en estudios posteriores. De esta forma se cumple el objetivo general de la investigación aquí presentada **“Desarrollar un sistema de monitorización de variables agrícolas soportado en la tecnología WSN para el cultivo de la yuca en el departamento del Atlántico con el propósito de mejorar la calidad de la cosecha”** debido a que se le brinda no solo al agricultor sino también a comunidades investigativas y entidades interesadas en el estudio de la yuca como Finagro, CIAT, Clayuca, entre otras, una herramienta de captura y monitorización en tiempo real de las variables agrícolas que afectan los cultivos de yuca.

Capítulo No 8. Conclusiones

CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas con el prototipo desarrollado demuestran su factibilidad, utilidad y viabilidad de implementarlo en plantaciones de yuca. Además, se demuestra que las *WSN* pueden trabajar de forma óptima en campos típicos de cultivo de yuca en la región del caribe colombiano en áreas aproximadas inferiores a 50m X 50m, y de ser necesario, pueden abarcar mayores distancias por medio de enlaces multi-saltos usando en cualquier caso el protocolo RPL para el descubrimiento automático de las rutas. Las características de hardware de las motas utilizadas (*Z1*) son suficientes para ejecutar *RPL* y operar sin inconvenientes, adicionalmente brinda la posibilidad de operar con el protocolo *CoAP* en caso de ser necesario en futuras pruebas o mejoras de la red descartando la necesidad de adquirir un nuevo *hardware*.

Al momento de evaluar los sistemas operativos más utilizados en las *WSN*, *resaltaron* dos bastante utilizados: *TinyOS* del que se destaca su uso en redes con recursos limitados, y *Contiki* cuya característica primordial es la flexibilidad de uso que brinda al programador por su compatibilidad con múltiples protocolos de comunicación *RPL*, *CoAP* y *6LoWPAN*, poco uso de la memoria de programa, programación en C estándar, comunidad de desarrolladores activa y colaboradora, también su implementación en equipos con características limitadas, la ventaja de poseer un simulador propio llamado *Cooja*, entre otras características indispensables para la construcción de sistemas inalámbricos complejos.

Durante las pruebas de enlace, cuyos resultados se analizaron con el test *Kolmogorov-Smirnov* o *K-S* y el test de *Kruskal-Wallis* a través del software *MatLab*® se encontró que los equipos presentaron un mejor desempeño para las distancias de 10 m y 50

Capítulo No 8. Conclusiones

m ambas con línea de vista, mientras que para las distancias de 10 m con obstáculos y 100 m con línea de vista las pruebas arrojaron resultados desfavorables. Por lo analizado se evidencia que a las distancias comprendidas entre los 10 y 50 m sin obstáculos los equipos *Z1* pueden trabajar de forma óptima. Entonces como el campo de cultivo típico de yuca en la región caribe de Colombia aproximadamente son de áreas inferiores a 50m X 50m, es adecuado el despliegue de la red planteada en esta tesis.

Los presupuestos de enlaces calculados se compararon con los resultados alcanzados a través de simulaciones realizadas en el software *Radio Mobile* obteniendo valores parecidos en ambos casos por lo que se valida el uso del software para pruebas reales de campo. Por último, se realizaron pruebas experimentales con los equipos y el sensor *SHT11* en un cultivo de yuca de una hacienda del Municipio de Manatí consiguiendo en la toma de datos valores muy similares a los investigados en la literatura, dando por sentado la viabilidad de implementar este tipo de tecnologías y la posibilidad de realizar trabajos futuros relacionados con las *WSN* en diferentes cultivos.

Por lo tanto, las *WSN* se perfilan como una buena opción para la captura de datos en diferentes puntos de un área determinada con distancias considerables entre los nodos de la red aun cuando existen obstáculos entre ellos, ejemplo la vegetación presente en los cultivos de yucas con plantas que pueden alcanzar alturas entre 1 y 3 metros, o si se presenta un fallo en algún nodo, la información puede viajar a través de una ruta diferente hasta llegar al punto *Gateway*.

REFERENCIAS

- Abd-El-Barr, M. I., Youssef, M. A. M., & Al-Otaibi, M. M. (2005). Wireless sensor networks - part I: topology and design issues. In *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005*. (pp. 1165–1168).
<http://doi.org/10.1109/CCECE.2005.1557184>
- Aguilera Díaz, M. (2012). *La yuca en el Caribe colombiano: De cultivo ancestral a agroindustrial*. Cartagena.
- Al Daz-Rosas, J. C., Hernández-Constante, J., & Cedano-Ol, M. (2016). Cálculo de Radio Enlace Terrestre. In *SOMI XXXI Congreso de Instrumentación*. Ciudad de Guatemala. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Hernandez-Constante/publication/309591673_Calculo_de_Radio_Enlace_Terrestre/links/5818cf7008ae6378919e73db.pdf
- ANRG. (2014). RPL modificación objetiva función y simulación en cooja - Contiki. Retrieved January 9, 2017, from http://anrg.usc.edu/contiki/index.php/RPL_objective_function_modification_and_simulation_in_cooja#rpl-config.h
- Apache. (2017). The Apache Software Foundation! Retrieved November 27, 2016, from <https://www.apache.org/>
- Apachefriends. (2017). XAMPP Installers and Downloads for Apache Friends. Retrieved May 4, 2017, from <https://www.apachefriends.org/es/index.html>
- Aqeel-ur-Rehman, Abbasi, A. Z., Islam, N., & Shaikh, Z. A. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36(2), 263–270. <http://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.004>

- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. *Fao, 163*, 134. <http://doi.org/9253056770-9789253056774>
- ArunKumar, M., & Alagumeenaakshi, M. (2014). RPL optimization for precise green house management using wireless sensor network. In *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)* (pp. 1–6). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICGCCEE.2014.6922254>
- Atlantico.gov.co. (2017a). División Política. Retrieved April 2, 2017, from <http://www.atlantico.gov.co/index.php/departamento/divisionpoliticadepartamento>
- Atlantico.gov.co. (2017b). Informe de Empalme 2015 - 2016. Retrieved February 19, 2017, from <http://www.atlantico.gov.co/index.php/rendicioncuentas/informe-empalme/7481-informe-de-empalme-2015-2016>
- Baayen, R. H. (2008). *Analyzing linguistic data. A practical introduction to statistics using R* (1era ed.). Cambridge University Press.
- Bai, E., & Zhang, X. (2012). Performance Evaluation of 6LoWPAN Gateway Used in Actual Network Environment. In *2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology* (pp. 1036–1039). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICCECT.2012.196>
- Balamurali, R., & Kathiravan, K. (2015). An analysis of various routing protocols for Precision Agriculture using Wireless Sensor Network. In *2015 IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR)* (pp. 156–159). IEEE. <http://doi.org/10.1109/TIAR.2015.7358549>
- Bartolomé Arquillo, D., Claros Moreno, D., Domínguez Durán, M., Urdiales García, C., Trapero Miralles, R., & Sandoval, F. (2007). Caracterización del alcance y la potencia

- en redes de sensores inalámbricas. *XXII Simposium Nacional de La Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2007)*. Retrieved from http://www.grupoisis.uma.es/administrator/components/com_jresearch/files/publications/BartolomeUrsi2007.PDF
- Beeharry, J., & Nowbutsing, B. (2016). Forecasting IPv4 exhaustion and IPv6 migration. In *2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech)* (pp. 336–340). IEEE. <http://doi.org/10.1109/EmergiTech.2016.7737362>
- Bencini, L., Maddio, S., Collodi, G., Di Palma, D., Manes, G., & Manes, A. (2012). Development of Wireless Sensor Networks for Agricultural Monitoring (pp. 157–186). Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-642-27638-5_9
- Beradinelli, J. A. S. (2015). *Plan de desarrollo Gobernación del Atlántico 2012-2015*.
- Blumenthal, J., Grossmann, R., Golatowski, F., & Timmermann, D. (2007). Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks. In *2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing* (pp. 1–6). IEEE. <http://doi.org/10.1109/WISP.2007.4447528>
- Bongiovanni Rodolfo, Chartuni-Mantovani Evandro, Best Stanley, & Roel Álvaro. (2006). *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. (PROCISUR, Ed.) (PROCISUR). Montevideo,UY.
- Braden, R. (1989). Requirements for Internet Hosts - Communication Layers. Retrieved November 26, 2016, from <https://tools.ietf.org/html/rfc1122>
- Brandt, A., Vasseur, J. P., Hui, J., Pister, K., Thubert, P., Levis, P., ... Winter, T. (2012). RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. RFC Editor.

<http://doi.org/10.17487/rfc6550>

Buratti, C., Conti, A., Dardari, D., & Verdone, R. (2009). An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors*, 9(9), 6869–6896.

<http://doi.org/10.3390/s90906869>

Burgos, Á. M., Argüello, J. A., Prause, J., & Cenóz, P. J. (2013). Fenología de los estados vegetativos de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) en base al tiempo térmico.

Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo, 45(1).

Retrieved from http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-86652013000100004

Caicedo-Ortiz, J., & Acosta-Coll, M. (2014). *Diseño de una red de sensores inalámbrica (WSN) en sur del Departamento del Atlántico para el monitoreo de las principales variables que influyen en la formación de altas precipitaciones, con el fin de desarrollar un sistema de alarmas tempranas (S.A.T)*. Barranquilla.

Cama, A., De la Hoz, E., & Cama, D. (2012). Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas. *Revista INGE CUC, Volumen 8, Número 1, Octubre de 2012, Pp. 163-172*.

Casar-Corredera, J. (2005). *Tecnologías y Servicios para la Sociedad de la Información*.

Madrid: Consejo Social, Universidad Politécnica de Madrid. Retrieved from

[http://www.upm.es/sfs/Rectorado/Organos de Gobierno/Consejo](http://www.upm.es/sfs/Rectorado/Organos%20de%20Gobierno/Consejo)

[Social/Actividades/tecnologias_servicios_para_sociedad_informacion.pdf](http://www.upm.es/sfs/Rectorado/Organos%20de%20Gobierno/Consejo/Social/Actividades/tecnologias_servicios_para_sociedad_informacion.pdf)

Castro C., N. D., Chamorro F., L. E., & Viteri M., C. A. (2016). Una red de sensores inalámbricos para la automatización y control del riego localizado. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 106. <http://doi.org/10.22267/rcia.163302.57>

- Castro Heredia, J. (2014). *Uso del protocolo CoAP para la implementación de una aplicación domótica con redes de sensores inalámbricas*. Universidad Politécnica de Cartagena Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Retrieved from <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4163/pfc5908.pdf?sequence=1>
- Ceballos, H. (2002). *La yuca en el Tercer Milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. Ciat.
- Cedeño, J., Zambrano, | M, & Medina, | C. (2014). Redes inalámbricas de sensores eficientes para la agroindustria. *Prisma Tecnológico* |, 5(1).
- Chambers, J. M. (1983). *Graphical methods for data analysis*. Wadsworth International Group. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=I-tQAAAAMAAJ>
- Chen, Y., Hou, K. M., Zhou, H., Shi, H. L., Liu, X., Diao, X., ... De Vault, C. (2011). 6LoWPAN stacks: A survey. *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2011*, 6–9. <http://doi.org/10.1109/wicom.2011.6040344>
- CISCO. (2008). Medición de retraso, fluctuación y pérdida de paquetes con SAA y RTTMON del IOS de Cisco Contenidos. Retrieved November 30, 2016, from http://www.cisco.com/cisco/web/support/LA/7/77/77854_saa.pdf
- CISCO. (2017). Uso de los Comandos Ping Extendido y Traceroute Extendido - Cisco. Retrieved May 29, 2017, from http://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/ip/routing-information-protocol-rip/13730-ext-ping-trace.html
- Clausen, T., & Herberg, U. (2010). Multipoint-to-Point and Broadcast in RPL. In *2010 13th International Conference on Network-Based Information Systems* (pp. 493–498). IEEE. <http://doi.org/10.1109/NBiS.2010.38>

- Clausen, T., Herberg, U., & Philipp, M. (2011). A critical evaluation of the IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL). In *2011 IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)* (pp. 365–372). IEEE. <http://doi.org/10.1109/WiMOB.2011.6085374>
- Clemente, R. S., José, G. P., & Teresa, P. L. (2017). *Fundamentos conceptuales de las principales pruebas de significación estadística en el ambito educativo*. (G. E. Universitario, Ed.). Retrieved from <http://www.ugr.es/~erivera/PaginaDocencia/Posgrado/Documentos/ClementeCuadernoInferencial.pdf>
- Cock, J. H. (1989). *La Yuca, Nuevo Potencial para un cultivo tradicional*.
- Colina, A. L., Vives, A., Zennaro, M., Bagula, A., & Pietrosemoli, E. (2016). *Internet of Thingsv In 5 Days*. Retrieved from http://wireless.ictp.it/school_2016/book/IoT_in_five_days-v1.0.pdf
- Contiki-os.org. (2017). Contiki: The Open Source Operating System for the Internet of Things. Retrieved from <http://www.contiki-os.org/#why>
- Contreras, J. P. G. (2013). ¿El TLC con Estados Unidos es la puerta a la marginación del sector agropecuario en Colombia?
- Crossbow. (2016). MICA2. Crossbow technology. Retrieved from <https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2.pdf>
- Decagon Devices. (2015). EM50 Digital Data Logger. Retrieved May 9, 2017, from <https://www.decagon.com/en/data-loggers-main/data-loggers/em50-digitalanalog-data-logger/>
- Docmac, M. D., Silva, E. I., & González, A. J. (2013). Evaluación de algoritmos para la

estimación del Round-Trip Delay Time y una propuesta de mejora. *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial RIAI*, 10(1), 62–72.

<http://doi.org/10.1016/j.riai.2012.11.006>

Eduardo Verano de la Rosa. (2016). *Plan de desarrollo 2016 - 2019 Gobernación del Atlántico*. Retrieved from

http://www.uniatlantico.edu.co/uatlantico/sites/default/files/Plan_Desarrollo_Ver_PP_D2016-2019_v.f_Atlántico.compressed.pdf

eKo PRO Series. (2016). eKo Outdoor Wireless System. Retrieved from

http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/eko_starter_system.pdf

El-Hoiydi, A., & Decotignie, J.-D. (2004). WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for Multi-hop Wireless Sensor Networks (pp. 18–31). Springer Berlin Heidelberg.

http://doi.org/10.1007/978-3-540-27820-7_4

El-kader, S. M. A., & El-basioni, B. M. M. (2013). Precision farming solution in Egypt using the wireless sensor network technology. *Egyptian Informatics Journal*, 14(3),

221–233. <http://doi.org/10.1016/j.eij.2013.06.004>

España Boquera, M. C. (2003). *Servicios avanzados de telecomunicación*. Díaz de Santos.

Estévez, F. J., Glösekötter, P., & González, J. (2016). DARAL: A Dynamic and Adaptive Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16(7).

<http://doi.org/10.3390/s16070960>

Evans, D. (2011). *The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Retrieved from

http://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf

- Farooq, M. O., & Kunz, T. (2011). Operating systems for wireless sensor networks: a survey. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *11*(6), 5900–30.
<http://doi.org/10.3390/s110605900>
- Felsche, M., Huhn, A., & Schwetlick, H. (2012). Routing Protocols for 6LoWPAN. In M. Liñán Reyes, J. M. Flores Arias, J. J. de la Rosa, J. Langer, F. J. Bellido Outeiriño, & A. Moreno-Munñoz (Eds.), *IT Revolutions: Third International ICST Conference, Córdoba, Spain, March 23-25, 2011, Revised Selected Papers* (pp. 71–83). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-642-32304-1_7
- Fuenlabrada de la Vega Trucios, S., & Fuenlabrada Velázquez, I. R. (2014). *Probabilidad y estadística*. McGraw-Hill Interamericana. Retrieved from
<http://www.educal.com.mx/0500-ciencias-puras/438554-probabilidad-y-estadistica-4a-edicion.html>
- Gaddour, O., Koubaa, A., Chaudhry, S., Tezeghdanti, M., Chaari, R., & Abid, M. (2012). Simulation and performance evaluation of DAG construction with RPL. In *Third International Conference on Communications and Networking* (pp. 1–8). IEEE.
<http://doi.org/10.1109/ComNet.2012.6217747>
- Gil, E. (2010). Situación actual y posibilidades de la agricultura de precisión. *Tesis de Grado*, 1–47.
- Gries, S. T. (2009). *Quantitative corpus linguistics with R. A practical introduction*. (Routledge, Ed.) (2da ed.).
- Gutierrez, A. M. A. (2009). *Variabilidad Genética y Grado de Adopción de la Yuca (Manihot esculenta Crantz) Cultivada por Pequeños Agricultores de la Costa Atlántica Colombiana*.

- Han, S., Kang, Y., Park, K., & Jang, M. (2007). Design of Environment Monitoring System for Aquaculture Farms. In *2007 Frontiers in the Convergence of Bioscience and Information Technologies* (pp. 889–893). IEEE. <http://doi.org/10.1109/FBIT.2007.77>
- Hinden, R. M., & Deering, S. E. (2003). Internet Protocol Version 6 (IPv6) Addressing Architecture. Retrieved November 26, 2016, from <https://tools.ietf.org/html/rfc3513#section-2.1>
- Hornsby, A., & Bail, E. (2009). μ XMPP: Lightweight implementation for low power operating system Contiki. In *2009 International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops* (pp. 1–5). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICUMT.2009.5345594>
- Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G. (2005). *GPS: Posicionamiento Satelital*. (1a ed.). Rosario, Argentina.
- Hugo, G. G. (2009). *Estadística*. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/2010/1/hugogomezgiraldo.2009.pdf>
- Hui, J., & Thubert, P. (2011). Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks. Retrieved November 26, 2016, from <http://www.rfc-editor.org/info/rfc6282>.
- Ibiblio. (2016). Capítulo 2. La Arquitectura LAMP. Retrieved November 27, 2016, from <https://www.ibiblio.org/pub/linux/docs/LuCaS/Manuales-LuCAS/doc-curso-salamanca-LAMP/lamp-teoria-html/ch02.html>
- Ibrahim, D. (2010). Design of a GPS data logger device with street-level map interface. *Advances in Engineering Software*, *41*(6), 859–864. <http://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.02.003>

- IEEE-SA, & SOCIETY, I. C. (2011). *Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) IEEE Computer Society* (Vol. 2011).
- Infoagro. (2017). Agricultura. El cultivo de la yuca. Retrieved May 20, 2015, from <http://www.infoagro.com/hortalizas/yuca.htm>
- IXIA. (2014). Measuring Network Convergence Time. Retrieved from www.ixiacom.com
- Jeferson Cotrim. (2016). Protocolo de Roteamento RPL. Retrieved from <http://professor.ufabc.edu.br/~joao.kleinschmidt/aulas/rsf2016/rpl.pdf>
- Jeonggil Ko, Terzis, A., Dawson-Haggerty, S., Culler, D. E., Hui, J. W., & Levis, P. (2011). Connecting low-power and lossy networks to the internet. *IEEE Communications Magazine*, 49(4), 96–101. <http://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5741163>
- Jiber, Y., Harroud, H., & Karmouch, A. (2011). Precision agriculture monitoring framework based on WSN. In *2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference* (pp. 2015–2020). IEEE. <http://doi.org/10.1109/IWCMC.2011.5982844>
- José Manuel Linares Arenas. (2014). *Simulación e implementación de una red de sensores inalámbrica multisalto para la medición de consumo energético en un edificio*. Universidad Politécnica de Catalunya. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21161/memoria.pdf>
- Karn, P., & Partridge, C. (1991). Improving round-trip time estimates in reliable transport protocols. *ACM Transactions on Computer Systems*, 9(4), 364–373. <http://doi.org/10.1145/118544.118549>
- Kermajani, H., & Gomez, C. (2014). On the network convergence process in RPL over

- IEEE 802.15.4 multihop networks: improvement and trade-offs. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14(7), 11993–2022. <http://doi.org/10.3390/s140711993>
- Kermajani, H. R., & Gomez, C. (2011). Route change latency in low-power and lossy wireless networks using RPL and 6LoWPAN Neighbor Discovery. In *2011 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)* (pp. 937–942). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ISCC.2011.5983962>
- Khedo, K. K., Hosseney, M. R., & Toonah, M. Z. (2014). PotatoSense : A Wireless Sensor Network System for Precision Agriculture, 1–11.
- Ko, J., Dawson-Haggerty, S., Gnawali, O., Culler, D., & Terzis, A. (2011). Evaluating the Performance of RPL and 6LoWPAN in TinyOS.
- Kodali, R. K., & Rawat, N. (2013a). Wireless sensor network in mango farming. In *2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)* (pp. 1–6). IEEE. <http://doi.org/10.1109/NUiCONE.2013.6780119>
- Kodali, R. K., & Rawat, N. (2013b). Wireless sensor network in Mango Farming.
- Koubaa, A., Chaudhry, S., Gaddour, O., Chaari, R., Al-Elaiwi, N., Al-Soli, H., & Boujelben, H. (2011). Z-Monitor: Monitoring and analyzing IEEE 802.15.4-based Wireless Sensor Networks. In *2011 IEEE 36th Conference on Local Computer Networks* (pp. 939–947). IEEE. <http://doi.org/10.1109/LCN.2011.6115575>
- Kumar, N. P., & Jatoth, R. K. (2015). Development of cloud based light intensity monitoring system using raspberry Pi. In *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)* (pp. 1356–1361). IEEE. <http://doi.org/10.1109/IIC.2015.7150959>
- Kushalnagar, N., Montenegro, G., Culler, D. E., & Hui, J. W. (2007). Transmission of IPv6

Packets over IEEE 802.15.4 Networks. Retrieved November 26, 2016, from <https://tools.ietf.org/html/rfc4944>

Leiva, F. R. (2003). La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista. *Memorias VIII Congreso de La Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento Y Producción de Cultivos*, (January 2003), 8. Retrieved from http://www.researchgate.net/profile/Fabio_Leiva/publication/228425520_La_agricultura_de_precisin_una_produccion_ms_sostenible_y_competitiva_con_visin_futurista/links/555ce20508ae8c0cab2a6901.pdf

Levis, P., & Clausen, T. H. (2011). The Trickle Algorithm. Retrieved January 9, 2017, from <https://tools.ietf.org/html/rfc6206>

Li, M. P. (2007). *Jitter, Noise, and Signal Integrity at High-Speed*. Pearson Education. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=vmBJYOOFSwYC>

Libelium. (2011). Retrieved June 19, 2015, from <http://www.libelium.com/products/waspmote>

Lozoya, C., Aguilar, A., & Mendoza, C. (2016). Service Oriented Design Approach for a Precision Agriculture Datalogger. *IEEE Latin America Transactions*, 14(4), 1683–1688. <http://doi.org/10.1109/TLA.2016.7483501>

Magette, W. (2000). Monitoring. In *Agricultural Nonpoint Source Pollution*. CRC Press. <http://doi.org/doi:10.1201/9781420033083.ch11>

Mahmoud, K. H. (2013). *Data collection and processing from distributed system of wireless sensors*. Masaryk University.

Mallinson, M., Drane, P., & Hussain, S. (2007). Discrete Radio Power Level Consumption

Model in Wireless Sensor Networks. In *2007 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems* (pp. 1–6). IEEE.

<http://doi.org/10.1109/MOBHOC.2007.4428756>

Manati-atlantico.gov.co. (2017). Nuestro Municipio. Retrieved February 19, 2017, from http://www.manati-atlantico.gov.co/informacion_general.shtml

Maohua, W. (2001). Possible adoption of precision agriculture for developing countries at the threshold of the new millennium. *Computers and Electronics in Agriculture*, *30*(1), 45–50. [http://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00154-X](http://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00154-X)

María Gil-Jiménez. (2008). *Estudio de la eficiencia de encaminamiento del protocolo AODV en redes ad hoc inal´ambricas de gran escala*. Rey Juan Carlos.

Marvell. (2016). SheevaPlug Development Kit Reference Design. Retrieved from <http://nic.ath.cx/PDF/misc/SheevaPlug.pdf>

Mat, I., Mohd Kassim, M. R., Harun, A. N., & Mat Yusoff, I. (2016). IoT in Precision Agriculture applications using Wireless Moisture Sensor Network. In *2016 IEEE Conference on Open Systems (ICOS)* (pp. 24–29). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICOS.2016.7881983>

Matase, A., Gennaro, S. F. Di, Zaldei, A., Genesisio, L., & Vaccari, F. P. (2009). A wireless sensor network for precision viticulture : The NAV system, *69*, 51–58. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2009.06.016>

Mathworks, M. (2017a). Box Plots - MATLAB & Simulink - MathWorks España. Retrieved January 9, 2017, from <https://es.mathworks.com/help/stats/box-plots.html>

Mathworks, M. (2017b). Kstest. Retrieved January 9, 2017, from https://es.mathworks.com/help/stats/kstest.html?searchHighlight=kolmogorov&s_tid=

doc_srchtile

- Mathworks, M. (2017c). MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink. Retrieved January 9, 2017, from <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- McKight, P. E., Najab, J., McKight, P. E., & Najab, J. (2010). Kruskal-Wallis Test. In *The Corsini Encyclopedia of Psychology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <http://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0491>
- Md Zin, S., Badrul Anuar, N., Laiha Mat Kiah, M., & Khan Pathan, A. S. (2014). Routing protocol design for secure WSN: Review and open research issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 41, 517–530. <http://doi.org/10.1016/j.jnca.2014.02.008>
- Mei, D., & Xiao, X. (2016). Design and implementation of the transmission scheme of the sensor data based on the CoAP protocol. In *2016 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)* (pp. 210–215). IEEE. <http://doi.org/10.1109/CYBER.2016.7574824>
- MEMESIC. (2016). TELOS. *MEMSIC*. Retrieved from http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/telosb_datasheet.pdf
- Mian, A. N., Alvi, S. A., Khan, R., Zulqarnain, M., & Iqbal, W. (2016). Experimental Study of Link Quality in IEEE 802 . 15 . 4 using Z1 Motes. <http://doi.org/10.1109/IWCMC.2016.7577165>
- Mohamed, B., & Mohamed, F. (2015). QoS Routing RPL for Low Power and Lossy Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 1–10. <http://doi.org/10.1155/2015/971545>

- Montaldo, A., & Gunz, T. (1985). *La yuca o mandioca : cultivo, industrialización, aspectos económicos, empleo en la alimentación animal, mejoramiento*. San Jose, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- MSR Electronics. (2016). Datalogger MSR Data Loggers adquisidor de datos registradores instrumentos de medición. Retrieved May 9, 2017, from <http://www.msr.ch/es/>
- Muman Andrés Rojas Dávila. (2003). *Técnicas Estadísticas Paramétricas y No Paramétricas Equivalentes: Resultados Comparativos Por Simulación*; Escuela Superior Politécnica del Litoral. Retrieved from <http://www.iuma.ulpgc.es/~nunez/mastertecnologiastelecomunicacion/RecursosGenerales/TesisEstadisticaParametricayNoParametrica.pdf>
- MySQL. (2016). MySQL. Retrieved November 27, 2016, from <https://www.mysql.com/>
- Nack, F. (2010). An Overview on Wireless Sensor Networks. *Institute of Computer Science (ICS) University, Barlin*.
- Nagel, J. (2012). *Principales barreras para la adopción de las TIC en la agricultura y en las áreas rurales. Naciones Unidas - CEPAL*. Retrieved from <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/4011>
- Nandurkar, S. R., Thool, V. R., & Thool, R. C. (2014). Design and Development of Precision Agriculture System Using Wireless Sensor Network. *IEEE International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES)*.
- Nguyen Thanh Long, De Caro, N., Colitti, W., Touhafi, A., & Steenhaut, K. (2012). Comparative performance study of RPL in Wireless Sensor Networks. In *2012 19th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)* (pp. 1–6). IEEE. <http://doi.org/10.1109/SCVT.2012.6399404>

- Olsson, J. (2014). 6LoWPAN demystified. Retrieved November 30, 2016, from <http://www.ti.com/lit/wp/swry013/swry013.pdf>
- Orozco, Ó. A., & Llano Ramírez, G. (2016). Sistemas de Información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 15(28), 103–124. <http://doi.org/10.22395/rium.v15n28a6>
- Pascual, J. A. (2015). Raspberry Pi: ¿Qué modelo me compro? - ComputerHoy.com. Retrieved November 27, 2016, from <http://computerhoy.com/noticias/hardware/raspberry-pi-que-modelo-me-compro-23811>
- Pedrosa, I., Juarros-Basterretxea, J., Robles-Fernández, A., Basteiro, J., García-Cueto, E., & García-Cueto, E. (2014). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, 14(1), 245–254. <http://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy14-1.pbad>
- Peniak, P., & Franekova, M. (2016). Model of integration of embedded systems via CoAP protocol of Internet of Things. In *2016 International Conference on Applied Electronics (AE)* (pp. 201–204). IEEE. <http://doi.org/10.1109/AE.2016.7577273>
- Perfetti, J. J., Balcázar, Á., Hernández, A., & Leibovich, J. (2013). *Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia*.
- PHP-Group. (2016). PHP: Hypertext Preprocessor. Retrieved November 27, 2016, from <http://php.net/>
- Pinto, F. de A. de C., Queiroz, D. M. de, Chartuni, E., & Ruz, E. (2007). Agricultura de precisión : nuevas herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa

- agropecuaria. *Revista Palmas*, 28(4), 29–34.
- Piñeres-Espitia, G. (2015). *Evaluación del rendimiento del protocolo 6LoWPAN sobre una plataforma de hardware y software libre*. Universidad Tecnológica de Bolívar.
- Poe, W. Y., & Schmitt, J. B. (2009). Node deployment in large wireless sensor networks. In *Asian Internet Engineering Conference on - AINTEC '09* (pp. 77–84). New York, New York, USA: ACM Press. <http://doi.org/10.1145/1711113.1711127>
- Princy, S. E., & Nigel, K. G. J. (2015). Implementation of cloud server for real time data storage using Raspberry Pi. In *2015 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)* (pp. 1–4). IEEE. <http://doi.org/10.1109/GET.2015.7453790>
- Proskochylo, A., Vorobyov, A., Zriakhov, M., Kravchuk, A., Akulynichev, A., & Lukin, V. (2015). Overview of Wireless Technologies for Organizing Sensor Networks, 39–41.
- R. Fernández, J. Ordieres, F. Martínez, A. González, F. Alba, R. Lostado, A. V. (2009). *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica* (1st ed.). España: Universidad de la Rioja.
- Radio-Mobile. (2017). Radio Mobile WEB Site. Retrieved February 21, 2017, from <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>
- Raju, K. S., Huddar, S., Tanwar, P., & Patwardhan, A. (2013). Wireless sensor networks based public addressing system. In *2013 International Conference on Advanced Electronic Systems (ICAES)* (pp. 297–300). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICAES.2013.6659412>
- Raspberry-Pi. (2016). Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi. Retrieved November 27, 2016, from <https://www.raspberrypi.org/>

- Riquelme, J. A. L., Soto, F., Suardíaz, J., Sánchez, P., Iborra, A., & Vera, J. A. (2009). Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain, *68*, 25–35. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2009.04.006>
- Rukpakavong, W., Phillips, I., Guan, L., & Oikonomou, G. (2012). RPL router discovery for supporting energy-efficient transmission in single-hop 6LoWPAN. In *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 5721–5725). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICC.2012.6364812>
- S Deering, & R Hinden. (1998). Especificación Protocolo Internet, Versión 6 (IPv6). Retrieved November 26, 2016, from <https://www.rfc-es.org/rfc/rfc2460-es.txt>
- Santoshkumar, & Udaykumar R.Y, U. R. (2015). Development of WSN system for precision agriculture. In *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)* (pp. 1–5). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICIIECS.2015.7192904>
- Schumacher, C. P. P., Kushalnagar, N., & Montenegro, G. (2007). IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals. Retrieved November 26, 2016, from <https://tools.ietf.org/html/rfc4919>
- SENSIRION. (2003). SHT1x / SHT7x SHT1x / SHT7x Product Summary. Retrieved from <http://descargas.cetronic.es/SHT11.pdf>
- Sensores-de-medida.es. (2017). Registradores de datos - Dataloggers - Sensing. Retrieved April 24, 2017, from http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/EQUIPOS-DE-ADQUISICIÓN-DE-DATOS_32/Registradores-de-datos---Dataloggers_229/
- Shinghal, K., Noor, A., Srivastava, N., & Singh, R. (2010). Wireless sensor networks in

agriculture: For potato farming. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2, 3955–3963.

Soporte Minitab. (2016). Soporte de Minitab 17. Retrieved April 18, 2017, from <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/>

Srinivasan, A. (2006). *Handbook of precision agriculture : principles and applications*. New York, NY, USA: Food Products Press.

Standards.ieee.org. (2017). IEEE-SA -IEEE Get 802 Program - 802.15: Wireless PANs. Retrieved from <https://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>

Suryady, Z., Shaharil, M. H. M., Bakar, K. A., Khoshdelniat, R., Sinniah, G. R., & Sarwar, U. (2011). Performance evaluation of 6LoWPAN-based precision agriculture. In *The International Conference on Information Networking 2011 (ICOIN2011)* (pp. 171–176). IEEE. <http://doi.org/10.1109/ICOIN.2011.5723173>

Sutaria, R. (2017). Understanding Wireless Routing For IoT Networks. Retrieved March 31, 2017, from <http://electronicdesign.com/communications/understanding-wireless-routing-iot-networks>

T. Winter, P. Thubert, A. Brandt, J. Hui, R. Kelsey, P. Levis, ... R. Alexander. (2012). RFC 6550 - RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. Retrieved November 26, 2016, from <http://www.rfc-editor.org/info/rfc6550>.

Tanenbaum, A. S., & Núñez Ramos, E. (2003). *Redes de computadoras*. Pearson Educación.

Texas Instruments. (2008). Low Power Digital Temperature Sensor With SMBus™/Two-Wire Serial Interface in SOT563. Retrieved from <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/tmp102.pdf>

- Texas Instruments. (2017). CC2420. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>
- Tinyos.stanford.edu. (2017). TinyOS Documentation Wiki - TinyOS Wiki. Retrieved April 24, 2017, from http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/Main_Page
- Tobias Reusing. (2012). Comparison of Operating Systems TinyOS and Contiki. *Network Architectures and Services*, 7–13. http://doi.org/10.2313/NET-2012-08-2_02
- Tsvetkov, T. (2011). RPL: IPv6 Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks. *Network Architectures and Services*, 59–66. http://doi.org/10.2313/NET-2011-07-1_09
- U.S. Department of Agriculture. (1998). *Agriculture Fact Book 1998*. (Office of Communications, Ed.). Washington, DC. Retrieved from <http://www.usda.gov/documents/factbook1998.pdf>
- Urbano-molano, & Aparicio, F. (2012). Redes de Sensores Inalámbricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para Cultivos de Café en Colombia (Octubre 2012), 5(Octubre), 46–52.
- Vunabandi, V., Markon, S., & Willy, N. (2015). Flood Sensing Framework by Arduino and Wireless Sensor Network in Rural-Rwanda. In *2015 IEEE/ACIS 16th International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD)* (pp. 1–6). IEEE. <http://doi.org/10.1109/SNPD.2015.7176210>
- Wang, J., & Liu, G. (2012). A Design of Greenhouse Remote Monitoring System Based on WSN and WEB, 247–256.
- Wang, Y., Guardiola, I. G., & Wu, X. (2014). RSSI and LQI Data Clustering Techniques to

- Determine the Number of Nodes in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 1–11. <http://doi.org/10.1155/2014/380526>
- Wei Ye, Heidemann, J., & Estrin, D. (2002). An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies* (Vol. 3, pp. 1567–1576). IEEE. <http://doi.org/10.1109/INFCOM.2002.1019408>
- Weidong, Z., Chun, W., & Jing, H. (2010). Development of agriculture machinery aided guidance system based on GPS and GIS. *2010 World Automation Congress*.
- Weisstein, E. W. (2017). Schläfli Symbol. Retrieved February 21, 2017, from <http://mathworld.wolfram.com/SchlaefliSymbol.html>
- Xu, J., Liu, W., Lang, F., Zhang, Y., & Wang, C. (2010). Distance Measurement Model Based on RSSI in WSN. *Wireless Sensor Network*, 2(8), 606–611. <http://doi.org/10.4236/wsn.2010.28072>
- Xuemei Li, Yuyan Deng, & Lixing Ding. (2008). Study on precision agriculture monitoring framework based on WSN. In *2008 2nd International Conference on Anti-counterfeiting, Security and Identification* (pp. 182–185). IEEE. <http://doi.org/10.1109/IWASID.2008.4688381>
- Yang, C., & Lee, W. (2013). Precision Agricultural Systems. In *Agricultural Automation* (pp. 63–94). CRC Press. <http://doi.org/doi:10.1201/b13962-6>
- Zennaro, M., Bagula, A., Gascon, D., & Noveleta, A. B. (2010). Long distance wireless sensor networks. In *Proceedings of the 4th ACM Workshop on Networked Systems for Developing Regions - NSDR '10* (pp. 1–2). New York, New York, USA: ACM Press. <http://doi.org/10.1145/1836001.1836013>

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview.

Computers and Electronics in Agriculture, 36(2), 113–132.

[http://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](http://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)

Zhang, R., Chen, L., Xu, G., & Wang, Y. (2009). Key Technologies in Wsn-Based Cotton Field Soilmoisture Monitoring System (pp. 2133–2140). Springer US.

http://doi.org/10.1007/978-1-4419-0213-9_65

Zolertia. (2010). Z1 Datasheet. Retrieved from

http://zolertia.sourceforge.net/wiki/images/e/e8/Z1_RevC_Datasheet.pdf

Zweng, M. J., Green, T., Kilpatrick, J., Pollak, H. O., & Suydam, M. (Eds.). (1983).

Proceedings of the Fourth International Congress on Mathematical Education.

Boston, MA: Birkhäuser Boston. <http://doi.org/10.1007/978-1-4684-8223-2>