

**Máster en Redes de Telecomunicación para Países en
Desarrollo**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

PROYECTO DE FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALAMBRICOS APLICADOS A LA
DETECCIÓN DE PESTICIDAS EN AGUAS DE ZONAS BANANERAS**

Autor: Iván Patricio Vizcaíno Espinosa

Tutor: Antonio Caamaño Fernández

Curso académico 2008/2010

ACTA DE EVALUACIÓN

Alumno: Ing. Iván Patricio Vizcaíno Espinosa Titulación: Máster en Redes de Telecomunicaciones para Países en Desarrollo Título del Proyecto: Red de Sensores Inalámbricos aplicados a la detección de pesticidas en aguas de zonas bananeras

Tutor: Dr. Ing. Antonio Caamaño

TRIBUNAL

Presidente: Vocal: Secretario:

CALIFICACIÓN DETALLADA DEL PROYECTO

	Presidente	Vocal	Secretario
Presentación escrita (MB-B-R-M-MM)			
Presentación oral (MB-B-R-M-MM)			
Complejidad técnica (MB-B-R-M-MM)			
Metodología empleada (MB-B-R-M-MM)			
Resultados obtenidos (MB-B-R-M-MM)			
Esfuerzo realizado (MB-B-R-M-MM)			

CALIFICACIÓN FINAL DEL PROYECTO

(nota numérica)	SB / NOT / AP / SS / NP
	Enmarcar la calificación alcanzada

PROYECTO PROPUESTO PARA MATRÍCULA DE HONOR: SÍ / NO

(sólo si la nota numérica final es igual a 10)

Fuenlabrada, Junio 2011

El Presidente

El Vocal

El Secretario

Se la dedico a mi Esposa y toda mi familia ya que se lo merecen todo.

También a mi padres.

RESUMEN

El presente trabajo describe la problemática en zonas agrícolas bananeras por efecto del uso de pesticidas y la contaminación de ríos con Nitratos, la variación del pH y del Oxígeno Disuelto entre otras variables. La falta de control en el uso de químicos en las tierras de cultivo y la descarga de contaminantes al medio ambiente por lixiviación de pesticidas de la tierra a los ríos, conlleva a la necesidad de sistemas de monitoreo de calidad del agua. Estas aguas no solamente sirven para regadío sino también para consumo animal y vida marina, de ahí la importancia de controles sobre la calidad de las aguas de río y de los suelos de cultivo.

En este trabajo se presenta una propuesta de dicha red de monitoreo en base a sensores de Nitratos, pH, Oxígeno Disuelto, temperatura, humedad relativa y luz. Se han ubicado siete puntos importantes cercanos a poblados a lo largo del río Jubones de la provincia de El Oro del Ecuador, cubriendo una distancia de aproximadamente 50 Km. Cada uno de estos puntos dispone además de 16 sensores inalámbricos que recolectan información de temperatura, humedad relativa y luz, cubriendo un área de 800 metros cuadrados por estación de monitoreo. Se dispone entonces un total de 112 sensores inalámbricos en todo el Sistema de Monitoreo. Esta información generada por las motas se transporta a un Gateway en cada uno de esos siete puntos, luego se enlazan estos puntos mediante una red inalámbrica a 2.4 GHz a un punto de recolección total de datos en la universidad de la ciudad de Machala de la provincia de El Oro.

El diseño de la red de transporte se lo ha realizado en base a Radio Mobile, y la calidad de la red de sensores inalámbricos se lo ha realizado mediante NS2. Mediante este último software se ha observado el comportamiento de la red WSN al utilizar dos modelos de propagación TwoRay y Shadowing. Se realizó la inyección de tráfico CBR y ftp.

Finalmente se presenta un sistema de monitoreo de calidad de agua en el río Jubones de la provincia de El Oro, mediante la ubicación de 112 sensores inalámbricos para la recolección de datos locales, y una red a 2.4 GHz para transporte de datos a un sumidero principal para su posterior procesamiento.

Índice General

<i>RESUMEN</i>	iv
PARTE I.....	13
INTRODUCCIÓN	14
1.1 Contaminación del suelo y del agua.....	14
1.2 Contaminación de fertilizantes en Ecuador.....	20
1.3 Legislación de niveles de contaminación por pesticidas	21
1.4 Planteamiento del problema	22
1.5 Objetivo.....	23
1.5.1 Objetivo general	23
1.5.2 Objetivos específicos.....	23
1.6 Fundamento teórico.....	24
1.6.1 Redes de monitoreo ambiental	24
1.6.2 Componentes de una Red de Monitoreo Ambiental.....	24
1.6.3 Variables físicas a medirse	25
1.6.4 Transmisión de datos.....	26
1.6.5 Software de aplicación, Sistemas de Información Geográfica SIG	26
1.6.6 Sistema autónomo de energía eléctrica	27
1.7 Sensores Inalámbricos WSN.....	27
1.7.1 Procesador interno de baja potencia.....	28
1.7.2 Memoria y almacenamiento	28
1.7.3 Transceptores de Radio	28
1.7.4 Dispositivos Sensores.....	28
1.7.5 Sistemas de Geoposicionamiento.....	28
1.7.5 Fuente de poder para WSN	29
1.7.6 Topologías y aplicaciones de los WSN [23]	29
1.8 Estándar IEEE 802.15.4 [22].....	31
<i>Task Group 1: IEEE 802.15.1 (WPAN / Bluetooth)</i>	31
<i>Task Group 2: IEEE 802.15.2 (Coexistencia)</i>	31
<i>Task Group 3: IEEE 802.15.3 (WPAN de alta velocidad)</i>	32
<i>Task Group 4: IEEE 802.15.4 (WPAN de baja velocidad)</i>	32
1.8.1 Capa física PHY	33
1.8.2 Capa de Acceso al Medio MAC.....	36

1.9 Estándar IEEE 802.15.4 / ZigBee	45
1.9.1 Clases de redes inalámbricas de corto alcance	45
1.9.2 Relación entre ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4	46
1.10 Sistema de Monitoreo Inalámbrico	47
PARTE II	49
METODOLOGÍA	49
2.1 Agricultura de precisión y redes de sensores inalámbricos	50
2.2 Zonas de cultivo de banano y contaminación de ríos por pesticidas	52
2.3 Sensores Inalámbricos	55
2.4 Sondas de Nitratos	60
2.5 Sondas de pH	64
2.6 Sondas de Oxígeno disuelto	65
2.7 Alimentación de sensores, sondas y controlador de datos	66
2.8 Software de simulación de la red WSN mediante NS2 [38]	68
2.8.1 Simulación y resultados	70
2.8.2 Análisis gráfico de la salida NAM	71
2.8.4 Herramienta Tracegraph	72
2.8.5 Modelos de Radiopropagación	73
Modelo del espacio libre	73
Modelo de reflexión de los dos rayos	73
Modelo Shadowing	74
2.8.6 Protocolos de encaminamiento [41]	75
Protocolo DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol)	76
Protocolo AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector)	77
Protocolo DSR (Dynamic Source Routing)	77
2.9 Simulación de la red de sensores inalámbricos mediante NS2	78
PARTE III	80
RESULTADOS	80
3.1 Diseño de la red de monitoreo de pesticidas en zonas bananeras del Ecuador	80
3.1.1 Planificación de la red	80
3.1.2 Entorno de despliegue	81
3.1.3 Esquema general de la red	83
3.1.4 Red de transporte	86
3.1.5 Estudio de propagación con Radio Mobile	86

3.1.6 Especificaciones a considerarse en Radio Mobile.....	86
3.1.7 Cálculo de desvanecimientos	98
3.1.8 Cálculo de indisponibilidad de los equipos.....	101
3.2 Frecuencia de actualización de las medidas	102
3.3 Precisión espacial de las medidas.....	104
3.4 Sistema de alimentación de los sensores y sondas	105
3.4.1 Tolerancia a fallas	105
3.5 Resultados de la Simulación en NS2.....	109
3.5.1 Topología de la red de sensores inalámbricos.....	113
3.5.2 Simulación con el modelo de propagación: TwoRayGround.....	115
<i>El Throughput</i>	119
<i>La suma acumulada</i>	120
<i>Throughput promedio</i>	121
<i>Jitter de los paquetes recibidos</i>	121
<i>El Retardo promedio</i>	123
3.5.3 Simulación con el modelo de propagación: Shadowing.....	123
El Throughput	123
3.6 Nodos de sensores inalámbricos, sondas de medición y equipos fotovoltaicos.....	124
3.7 Resumen de componentes de la Red de sensores inalámbricos y sondas de nitratos en aguas de zonas bananeras del Ecuador.....	127
3.8 Estudio de propagación de señales y estudio de tráfico de datos	129
3.9 Simulación de la red de sensores inalámbricos mediante NS2	130
3.10 Base de datos de la información recopilada	131
PARTE IV	134
CONCLUSIONES	134
Conclusiones	134
Trabajo futuro.....	135
ANEXO No 1: Hoja electrónica para descarga gratuita de HYDRUS 2.01.0980 Demo.....	138

Índice de figuras y tablas

<i>Figura 1. 1 Camino de los plaguicidas, herbicidas y fertilizantes hasta los seres vivos [5].</i>	17
<i>Figura 1. 2 Dispersión de contaminantes de un almacén al medio ambiente [8].</i>	19
<i>Figura 1. 3 Componentes de un Sistema de Monitoreo Ambiental.</i>	24
<i>Figura 1. 4 a) Esquema básico de un nodo sensor inalámbrico, b) Tamaño relativo del sensor con respecto a una moneda.</i>	27
<i>Figura 1. 5 Arreglo general de redes de sensores [23].</i>	30
<i>Figura 1. 6 Estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee [23].</i>	34
<i>Figura 1. 7 Bandas de frecuencia de la capa física de IEEE 802.15.4 [23].</i>	35
<i>Figura 1. 8 Estructura del paquete de la capa física IEEE 802.15.4 PHY[23].</i>	36
<i>Figura 1. 9 Opciones de acceso al medio inalámbrico en una red WSN.</i>	37
<i>Figura 1. 10 Topologías de red [23].</i>	39
<i>Figura 1. 11 a) Estructura de Super Trama, b) Estructura de la trama QoS, c) Estructura de la Super trama con ahorro de energía [23].</i>	41
<i>Figura 1. 12 a) Formato general de la trama MAC, b) formato de la trama Beacon, c) formato de la trama de Datos y Acknowledgment, d) formato de la trama de comandos MAC (continuación) [23].</i>	43
<i>Figura 1. 13 Comparación de estándares ZigBee, Bluetooth, IEEE 802.11.</i>	46
<i>Figura 1. 14 Capas del protocolo de red inalámbrica ZigBee.</i>	46
<i>Figura 1. 15 Protocolo de red basado en IEEE 802.15.4 que no contiene el estándar ZigBee.</i>	47
<i>Figura 2. 1 Facetas de la agricultura de precisión [17].</i>	51
<i>Figura 2. 2 Extracto del Mapa Político del Ecuador. Provincia de El Oro (aporta con el 30% del cultivo total del Ecuador)[25].</i>	53
<i>Figura 2. 3 Area de cultivo (Cn) de banano en la Provincia de El Oro.</i>	54
<i>Figura 2. 4 Tarjeta de Interface USB MIB520CB [33].</i>	56
<i>Figura 2. 5 Tarjeta MPR2400-MICAZ [33].</i>	56
<i>Figura 2. 6 Tarjeta de adquisición de datos MDA300CA [33].</i>	58
<i>Figura 2. 7 Tarjeta de adquisición de datos ambientales MTS400CA [33].</i>	58
<i>Figura 2. 8 Esquema de conexión de las tarjetas Crossbow.</i>	60
<i>Figura 2. 9 Módulo Sensor de Nitratos in-situ de WTW.</i>	61
<i>Figura 2. 10 Estructura del sensor UV/VIS [35].</i>	61
<i>Figura 2. 11 Sistema de limpieza NitraVis 700/xIQ TS en el IQ Sensor Net [35].</i>	62
<i>Figura 2. 12 Conexión del aire comprimido al módulo MIQ/CHV.</i>	63
<i>Figura 2. 13 Conexión del Sensor UV/VIS en el módulo MIQ/VIS.</i>	64
<i>Figura 2. 14 Sonda y armadura</i>	64
<i>Figura 2. 15 Sonda WTW de Oxígeno Disuelto TriOxmatic 701 IQ [35].</i>	66
<i>Figura 2. 16 Modelo de Wireless Sensor Network [37].</i>	68
<i>Figura 2. 17 Funcionamiento del NS2 [38].</i>	69
<i>Figura 2. 18 Estructura del archivo de salida *.tr</i>	70
<i>Figura 2. 19 Interfaz gráfica de la herramienta NAM [39].</i>	71
<i>Figura 2. 20 Interfaz de Trace Graph 2.2</i>	72
<i>Figura 2. 21 Topología de red de sensores en cada estación de monitoreo.</i>	78

<i>Figura 3. 1 Entorno de despliegue de la red de monitoreo en una región bananera de la provincia de El Oro.</i>	81
<i>Figura 3. 2 Poblados dentro de la zona de despliegue de la red.</i>	83
<i>Figura 3. 3 Despliegue de la red de monitoreo utilizando Radio Mobile.</i>	83
<i>Figura 3. 4 Despliegue general de la red de monitoreo.</i>	84
<i>Figura 3. 5 Dispositivos WTW para sensar presencia de Nitratos, Oxígeno Disuelto, nivel de acidez del agua (PH). Sensores inalámbricos Crossbow para sensar Temperatura ambiental, luz y humedad relativa.</i>	84
<i>Figura 3. 6 Conexión de equipos de medición y transmisión inalámbrica.</i>	85
<i>Figura 3. 7 Equipos necesarios para las repetidoras en 2.4 GHz.</i>	85
<i>Figura 3. 8 Enlace Unidad1 a Unidad2.</i>	88
<i>Figura 3. 9 Enlace Unidad1 a Unidad12.</i>	88
<i>Figura 3. 10 Enlace Unidad2 a Unidad12.</i>	89
<i>Figura 3. 11 Enlace Unidad2 a Unidad3.</i>	89
<i>Figura 3. 12 Enlace Unidad2 a Unidad4.</i>	90
<i>Figura 3. 13 Enlace Unidad2 a Unidad5.</i>	90
<i>Figura 3. 14 Enlace Unidad3 a Unidad4.</i>	91
<i>Figura 3. 15 Enlace Unidad3 a Unidad5.</i>	91
<i>Figura 3. 16 Enlace Unidad4 a Unidad5.</i>	92
<i>Figura 3. 17 Enlace Unidad5 a Unidad6.</i>	92
<i>Figura 3. 18 Enlace Unidad5 a Unidad7.</i>	93
<i>Figura 3. 19 Enlace Unidad7 a Unidad8.</i>	93
<i>Figura 3. 20 Enlace Unidad8 a Unidad9.</i>	94
<i>Figura 3. 21 Enlace Unidad8 a Unidad10.</i>	94
<i>Figura 3. 22 Enlace Unidad10 a Unidad11.</i>	95
<i>Figura 3. 23 Enlace Unidad12 a Unidad3.</i>	95
<i>Figura 3. 24 Red de transporte y factibilidad de radioenlaces.</i>	97
<i>Figura 3. 25 Red de monitoreo con sensores y sondas.</i>	102
<i>Figura 3. 26 Esquema general del sistema fotovoltaico.</i>	106
<i>Figura 3. 27 Diagrama del cableado de la regulación de carga FV.</i>	109
<i>Figura 3. 28 Programa de simulación HYDRUS 2.01.0980 Demo, ejecutando “Furrow Irrigation - water and solute, silt, 5 d” [50].</i>	111
<i>Figura 3. 29 Ventanas de configuración del modelo de simulación [50].</i>	111
<i>Figura 3. 30 Ventanas de configuración del modelo de simulación [50].</i>	112
<i>Figura 3. 31 Cambios de presión del agua en el surco luego de 0.050 días [50].</i>	112
<i>Figura 3. 32 Cambios de presión del agua en el surco luego de 1 día [50].</i>	113
<i>Figura 3. 33 Topología de WSN con separación de 10m entre nodos, ocupando un área de 800 metros cuadrados. Esto corresponde a una estación de monitoreo de las siete en total de la red.</i>	114
<i>Figura 3. 34 Throughput entre el nodo 4 y nodo 0.</i>	120
<i>Figura 3. 35 Suma acumulada de paquetes transmitidos y recibidos entre el nodo 4 y el nodo 4.</i>	120
<i>Figura 3. 36 Throughput promedio.</i>	121
<i>Figura 3. 37 Jitter de paquetes recibidos.</i>	122

<i>Figura 3. 38 Throughput de bit enviados versus promedio de retardo.</i>	122
<i>Figura 3. 39 Throughput entre el nodo 4 y nodo 0 para el modelo de propagación Shadowing.</i>	124
<i>Figura 3. 40 Conjunto de componentes Crossbow de las estaciones de monitoreo.</i>	124
<i>Figura 3. 41 Conjunto de componentes Crossbow.</i>	125
<i>Figura 3. 42 Conexión de equipos WTW y Crossbow.</i>	126
<i>Figura 3. 43 Convertidor de RS232 o RS485 a salida analógica [39].</i>	126
<i>Figura 3. 44 Equipos eléctricos del sistema fotovoltaico[41].</i>	127
<i>Figura 3. 45 Red de monitoreo de pesticidas en zonas bananeras del rio Jubones.</i>	128
<i>Figura 3. 46 Despliegue de la red de monitoreo en Radio Mobile.</i>	129
<i>Figura 3. 47 Topología de red de sensores en cada estación de monitoreo.</i>	131
<i>Tabla 1. 1 Frecuencias de trabajo para IEEE 802.15.4 – 2003.</i>	33
<i>Tabla 1. 2 Principales parámetros de la capa PHY IEEE 802.15.4 [23].</i>	35
<i>Tabla 2. 1 Factores indicativos de contaminación [31].</i>	54
<i>Tabla 2. 2 Criterios de calidad de las aguas [31].</i>	55
<i>Tabla 2. 3 Resumen de los productos MICA[33].</i>	57
<i>Tabla 2. 4 Especificaciones técnicas de MTS400CA [33].</i>	59
<i>Tabla 2. 5 Especificaciones técnicas del sistema NitraVis [35].</i>	62
<i>Tabla 2. 6 Datos técnicos de sonda de pH [35].</i>	65
<i>Tabla 2. 7 Consumo eléctrico de los equipos Crossbow.</i>	67
<i>Tabla 2. 8 Consumo eléctrico de los equipos WTW.</i>	67
<i>Tabla 2. 9 Valores típicos del exponente β.</i>	75
<i>Tabla 2. 10 Valores típicos de la desviación shadowing.</i>	75
<i>Tabla 3. 1 Ubicaciones de cada estación de monitoreo y repetidora.</i>	82
<i>Tabla 3. 2 Especificaciones del amplificador de RF[43]</i>	86
<i>Tabla 3. 3 Cuadro resumen de los cálculos de propagación de la Red.</i>	96
<i>Tabla 3. 4 Característica de sensibilidad del AP DWL-2100.</i>	97
<i>Tabla 3. 5 Valores del factor climático.</i>	99
<i>Tabla 3. 6 Cálculos de probabilidad de desvanecimientos por multi trayecto.</i>	101
<i>Tabla 3. 7 Plan de Monitoreo de aguas superficiales y sedimentos propuesto por la CAN[45].</i>	103
<i>Tabla 3. 8 Frecuencia de actualización de las medidas.</i>	104
<i>Tabla 3. 9 Consumo eléctrico individual de las estaciones de monitoreo, de las repetidoras y el conjunto de 16 WSN.</i>	105
<i>Tabla 3. 10 Cuadro de consumo eléctrico de las unidades de monitoreo.</i>	107
<i>Tabla 3. 11 Especificaciones eléctricas del panel solar [47].</i>	107
<i>Tabla 3. 12 Coordenadas geográficas de cada nodo.</i>	129
<i>Tabla 3. 13 Cuadro resumen de niveles de recepción.</i>	130
<i>Tabla 3. 14 Desvanecimientos en cada vano.</i>	130

Acrónimos

A.E.B.E. Asociación de Exportadores de Banano del Ecuador.

DBCP Nematicida, Dibromuro Cloro Propano.

OMS Organización Mundial de la Salud.

FAO Food and Agriculture Organization.

DBO Demanda Biológica de Oxígeno.

VHF Very High Frequency.

UHF Ultra High Frequency.

SIG Sistema de Información Geográfica.

GIS Geographic Information System, Sistema de Información Geográfica.

GPS Global Positioning System, Sistema de Posición Geográfica.

WSN Wireless Sensor Network, Red de Sensores Inalámbricos.

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

PHY Physical Layer Protocol, Protocolo de la capa física.

MAC Media Access Control, Control de Acceso al Medio.

WPAN Wireless Personal Area Networks, Redes de Area personal.

WLAN Wireless Lan Area Network

MB-OFDM Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

Zigbee Conjunto de protocolos de alto nivel basado en el estándar 802.15.4.

DSSS Direct Sequence Spread Spectrum.

PSDU PHY Service Data Unit.

CSMA/CD Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, Acceso Múltiple por Detección de Portadora con detector de colisiones.

FFD Full Function Device.

RFD Reduced Function Device.

AODV Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing.

GTS Guaranteed Time lots.

CFP Contention Free Period.

WTW Wissenschaftlich-Technische-Werkstätten.

NS Network Simulator.

NAM Network Animator.

DSDV Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol.

CGSR Clusterhead Gateway Switch Routing.

WRP Wireless Routing Protocol.

OLSR Optimized Link State Routing.

TBRPF Topology Dissemination Based on Reverse Path Forwarding.

DSR Dynamic Source Routing.

LMR Lightweight Mobile Routing.

TORA Temporary Ordered Routing Algorithm.

MTBF Mean Time Between Failures.

MTTR Mean Time To Recovery or Mean Time To Repair.

STICS Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard.

PARTE I
INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En los siguientes apartados se analizarán algunos puntos concernientes a la contaminación del medioambiente, específicamente de las zonas bananeras por efecto del uso excesivo de agroquímicos, y su efecto posterior de las aguas subterráneas y de los ríos que atraviesan dichas zonas. Muchos efectos se pueden mencionar por esta causa, entre ellos están, cambios en las concentraciones de Nitratos, Oxígeno Disuelto y niveles de pH en las aguas de ríos. Así como también variaciones en la humedad relativa del suelo que puede cambiar por la pluviosidad, la temperatura ambiental, la luz solar, y otras variables. Los cambios físico – químicos del suelo de cultivo pueden cambiar drásticamente el proceso de Lixiviación de pesticidas a las aguas subterráneas y aguas de los ríos, con las obvias consecuencias en la salud humana y toda forma de vida. Se plantea por lo tanto el problema de contaminación por pesticidas en el río Jubones de la provincia de El Oro en Ecuador, por efecto del uso de agroquímicos en las zonas bananeras que se filtran al suelo, o se lavan en la superficie y terminan en las aguas del río.

1.1 Contaminación del suelo y del agua

El aumento continuo de la población, su concentración progresiva en grandes centros urbanos, el desarrollo industrial y agrícola ocasionan, día a día, la contaminación de los suelos y aguas, que radica en la presencia de sustancias (basuras, fertilizantes, hidrocarburos, pesticidas y otros elementos) extrañas de origen humano en él [1]. La descarga de contaminantes al ambiente es prácticamente inevitable. Los contaminantes son liberados a través de las industrias, usos de productos y como resultado del tratamiento y disposición de los residuos urbanos e industriales [2].

El suelo es un medio receptivo por excelencia, puesto que interacciona con la litósfera, la hidrósfera y la atmósfera y recibe el impacto de los seres vivos que de manera directa e indirecta rompen el equilibrio químico establecido en su seno.

Es importante entender que el suelo está conformado por [1].

- ✓ **Elementos esenciales:** es decir aquellos que necesitan de la vegetación para vivir, como por ejemplo el nitrógeno, fósforo, potasio.
- ✓ **Medio elementos:** como el calcio, azufre, magnesio, cobre, boro, molibdeno.
- ✓ **Micro elementos:** como el hierro, manganeso, zinc, cobalto, selenio, yodo.
- ✓ **Micro elementos especiales:** como el sodio, cloro y silicio.

Estos elementos que conforman el suelo pueden encontrarse en diferentes formas, que dependen de muchos factores como el clima, el agua y la presión, entre otros. En

climas húmedos donde existen fuertes precipitaciones que dominan a la evaporación, existe una *lixiviación* o lavado de minerales desde la superficie hacia el interior del suelo.

Cada día la población mundial crece en 250.000 personas, de manera que se estima que el año 2020 se haya duplicado, y que casi el 95% de este aumento tendrá lugar en los países del tercer mundo o países en desarrollo. También diariamente se pierden 180Km² de bosque tropical, 110Km² de zona agrícola se convierten en desierto y se crean de 3 a 5 nuevos compuestos químicos de uso agrícola [3]. Habrá que admitir que el principal problema social a escala mundial es atender las necesidades alimentarias de su población, y paralelamente controlar el *impacto ambiental* que el incremento de la *actividad agrícola* puede causar.

Impacto de la actividad agrícola en el suelo y el agua

Desde el punto de vista de aumentar la producción agrícola, es evidente que se usa una *agricultura intensiva* que exige elevados insumos altamente contaminantes. Desde el punto de vista del respeto ambiental, se requiere una *agricultura biológica*, con menos requerimientos pero de bajo rendimiento y altos costes de producción. Entre estos dos puntos de vista se sitúa la *agricultura sostenible* que es la que maneja y utiliza con éxito los recursos disponibles, satisface las necesidades de la población, mantiene y mejora la calidad del medio ambiente y conserva los recursos naturales.

Técnicas utilizadas para alcanzar la sostenibilidad

Para alcanzar cierta sostenibilidad en las prácticas agrícolas se pueden aplicar diversas técnicas que se evidencian como buenas prácticas agrarias [3]. Entre estas técnicas se pueden mencionar:

- ✓ La diversificación de cultivos.
- ✓ Rotación de cultivos.
- ✓ Lucha biológica.
- ✓ Ingeniería genética.
- ✓ Adecuado manejo del suelo.
- ✓ Control de insumos.
- ✓ Lucha integrada.
- ✓ Mejora de prácticas de cultivo y uso racional del agua.

Las actividades agrícolas incluyen normalmente la utilización de fertilizantes y plaguicidas que pueden alcanzar las aguas superficiales y subterráneas. Entre las implicaciones ambientales producto de las *actividades agrícolas* se pueden mencionar:

- Pérdida del suelo por erosión.
- Salinización del suelo, por drenaje insuficiente.
- Deterioro del agua de drenaje y retorno de riegos.
- Contaminación por movilización de elementos tóxicos.
- Contaminación puntual y difusa por agroquímicos.
- Sobreexplotación de acuíferos.

Contaminación por Nitratos

El Nitrato es un compuesto inorgánico compuesto por un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de oxígeno (O). El símbolo químico del nitrato es NO_3 . El nitrato no es normalmente peligroso para la salud a menos que sea reducido a nitrito (NO_2).

El nitrato es uno de los más frecuentes contaminantes de *aguas subterráneas* en áreas rurales. Debe ser controlado en el agua potable principalmente porque niveles excesivos pueden provocar metahemoglobinemia, o “enfermedad de los bebés azules” [4]. Aunque los niveles de nitratos que afectan a los bebés no son peligrosos para niños, mayores y adultos, si indican la posible presencia de otros contaminantes más peligrosos procedentes de las residencias o de la agricultura, tales como bacterias o pesticidas.

El origen de nitratos en aguas subterráneas es principalmente debido a:

- ✓ Fertilizantes.
- ✓ Sistemas sépticos.
- ✓ Almacenamiento de estiércol.

Los fertilizantes nitrogenados son absorbidos por las plantas, volatilizados, o arrastrados por la superficie y acaban en las aguas subterráneas en forma de nitratos. Esto hace que el nitrógeno no esté disponible para las plantas, y puede elevar también la concentración en aguas subterráneas por encima de los niveles admisibles de calidad del agua potable. El nitrógeno procedente del estiércol o de los abonos puede perderse de manera similar en los prados, corrales, o lugares de almacenamiento. Los sistemas sépticos eliminan solamente la mitad del nitrógeno de las aguas residuales, dejando que la otra mitad sea lavada hacia aguas subterráneas, de esta forma aumentando las concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas.

Por otro lado, los *fitosanitarios* que son útiles para combatir los parásitos y enfermedades de las plantas, al ser introducidos en el medio ambiente pueden seguir diversos caminos: atmósfera, suelo y agua, pudiendo intercambiarse de un sistema a otro formando un ciclo.



Figura 1.1 Camino de los plaguicidas, herbicidas y fertilizantes hasta los seres vivos [5].

La Figura 1.1 muestra el camino seguido por los plaguicidas, herbicidas y fertilizantes utilizados generalmente en la agricultura. Una vez en el suelo y dependiendo de sus características físico-químicas, pueden seguir varios caminos hasta llegar a las aguas subterráneas y luego a los seres vivos.

La naturaleza de estos elementos contaminantes se explica a continuación.

- ✓ **Los Plaguicidas** son sustancias o compuestos químicos que sirven para combatir los parásitos de los cultivos, del ganado, de los animales domésticos, del hombre y su ambiente.
- ✓ **Los herbicidas** son sustancias que evitan el desarrollo de determinadas plantas no deseables.
- ✓ **Los fertilizantes** son productos químicos que aportan nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas.

Niveles de Oxígeno Disuelto en el Agua

Las aguas de los ríos normalmente suelen estar saturadas de oxígeno, más aún cuando éstas se hallan en circulación, lo cual es muy importante para la vida vegetal y animal. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo (menor a 2 mg/l, [18]), esto indica que las aguas pueden estar contaminadas con materia orgánica, por problemas de fugas de aguas sépticas, incapacidad por mantener determinadas formas de vida, y en general, mala

calidad del agua por efecto de la contaminación por agroquímicos muy utilizados en la agricultura que cambian notablemente los niveles de oxígeno normal de las aguas.

Variación de la temperatura ambiental y del agua

El aumento de temperatura del agua disminuye la solubilidad de gases (oxígeno) y aumenta, en general, la de las sales. Aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo, acelerando la putrefacción. La temperatura óptima del agua para beber está entre 10 y 14°C [6].

Entre los causantes del aumento de la temperatura de manera inusual están, las centrales nucleares, térmicas y otras industrias que contribuyen a la contaminación térmica de las aguas, llegando muchas a situaciones alarmantes.

Variación del nivel de acidez del agua pH

Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO₂ disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos. Estos pueden provenir por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, por ácidos húmicos disueltos de la superficie del suelo. La principal sustancia básica en el agua natural es el carbonato cálcico que puede reaccionar con el CO₂ formando un sistema tampón carbonato/bicarbonato.

Las aguas contaminadas por efecto de los desechos mineros o industriales pueden tener pH muy ácido. Los valores del pH del agua pueden tener mucha influencia en los procesos químicos que tienen lugar en la misma agua como por ejemplo actuación de los floculantes (sustancia química que aglutina sólidos en suspensión), tratamientos de depuración entre otros.

El agua puede cambiar su naturaleza y adquirir una gran variedad de componentes inorgánicos a través del contacto con el ambiente que puede ser el aire (gases), contacto con la tierra (minerales), y contactos con ambientes contaminados por el hombre (zonas agrícolas). Todo esto puede cambiar su naturaleza química como por ejemplo el nivel de acidez (pH). En aguas naturales el nivel de acidez puede estar entre 7 y 9, en los océanos entre 8 y 8.4. Por otro lado una concentración baja menor a 7 puede representar presencia de materiales tóxicos. Todo esto cambia el hábitat para el crecimiento de seres vivos ya sean animales o plantas [6].

Pluviosidad y contaminación las aguas de río

Cuando en los suelos de cultivo se ha vertido de manera desproporcionada los fertilizantes, esto no solamente afecta a la zona agrícola, también pone en riesgo a las zonas cercanas ya que en caso de lluvia el exceso de fertilizantes puede moverse hacia otras zonas que no lo necesitaban. Pero lo más peligroso es que estos agroquímicos pueden ser arrastrados a las zonas más bajas, entre las cuales están los ríos.

La determinación de una correlación entre niveles de contaminación de ríos por pesticidas y los niveles de pluviosidad, pueden ayudar a prevenir desastres y contaminación del agua especialmente en las zonas de alta producción agrícola.

Cambios en la humedad relativa del aire

La humedad ambiental se refiere a la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Se puede expresar mediante el término de humedad relativa, que relaciona de manera porcentual la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura. Por ejemplo, una humedad relativa del 70% quiere decir que la totalidad de vapor de agua (el 100%) que podría contener el aire a esta temperatura, sólo tiene el 70% [7].

Los cambios en la humedad relativa del aire pueden afectar al contenido de humedad del suelo, y de esta manera modificar el proceso de lixiviación de pesticidas a los ríos.

Una práctica bastante común en la administración de agroquímicos a las plantaciones de banano debido a sus grandes extensiones, es mediante aeronaves que suministran desde el aire grandes cantidades de químicos. Estos antes de llegar a las plantaciones contaminan previamente el aire, el cual puede ser transportado a sectores poblados creando grandes problemas de salud.

Una forma de verificar también la dispersión del aire contaminado y sus afecciones a la salud, a otras zonas de cultivo, es mediante la medida de cambios en la humedad relativa, precisamente durante los periodos de fumigación.

En la Figura 1.2 muestran los posibles caminos que sigue un contaminante dispersado en el aire por razones naturales o provocadas por efecto de fumigación [8]. Los plaguicidas son llevados del Almacenamiento hacia las aeronaves para la fumigación de grandes plantaciones de banano. Estos químicos caen a las plantas y al suelo filtrándose a las capas superiores y a las subterráneas. Esto conlleva a la contaminación de aguas subterráneas y aguas superficiales que termina en los ríos y los mares.

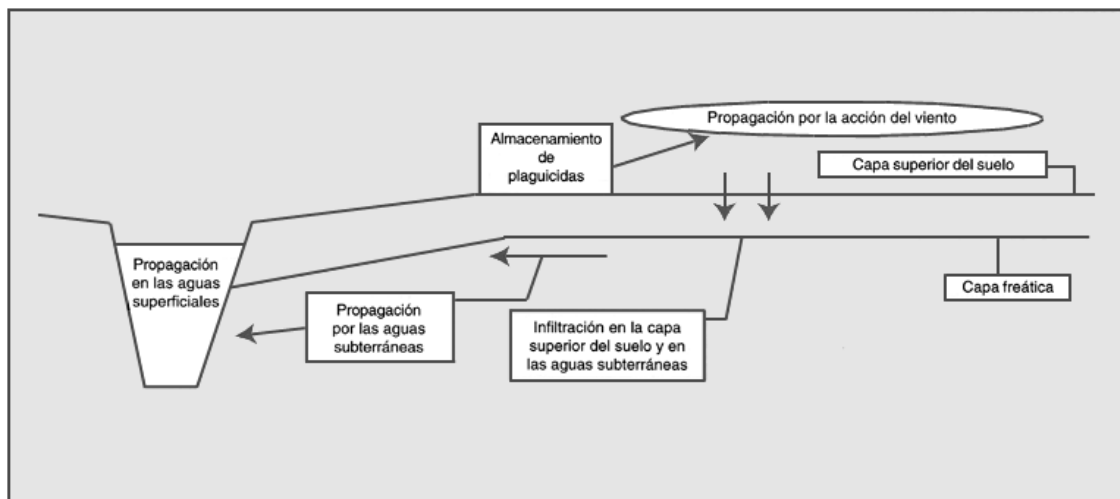


Figura 1.2 Dispersión de contaminantes de un almacén al medio ambiente [8].

Para la evaluación de la contaminación por dispersión de plaguicidas mostrada en la Figura 1.2, se pueden seguir algunos pasos básicos: determinación de los plaguicidas

pertinentes, evaluación de la contaminación causada por infiltración, evaluación de la contaminación de aguas subterráneas, determinación de la dispersión por el viento.

1.2 Contaminación de fertilizantes en Ecuador

En el caso de Ecuador, se puede decir que la contaminación a gran escala comenzó con la modernización del Estado a partir de la primera Reforma Agraria en 1963, y que se afianzó con el auge petrolero a partir de la década de 1970. Hasta entonces, el Ecuador había sido un país típicamente agro exportador. En 1950 el 70% de la población vivía en el campo y apenas el 30% en las ciudades; no había tantas industrias ni automóviles ni se utilizaban tantos pesticidas como ahora [9]. A comienzos del tercer milenio, más de 40 años después, las ciudades y las industrias han aumentado a tal punto que el 60% de la gente ecuatoriana vive en las ciudades y apenas el 40% en las áreas rurales.

En general la agricultura requiere de las plagas como por ejemplo insectos, hongos y bacterias, ya que son muy beneficiosos para combatir otros insectos que dañan las cosechas. Por ejemplo las bacterias y los hongos permiten fabricar el pan, el vino, los antibióticos y muchas otras sustancias de gran interés. Se calcula que al menos el 10% de la cosecha mundial es destruida por las plagas mientras se halla almacenada. Durante el crecimiento de las cosechas se producen también grandes pérdidas y se estima que entre el 30% y el 40% de las cosechas y la ganadería se pierde por las plagas [9].

Según datos reportados por el Instituto de Investigaciones Económicas y Políticas de la Universidad Estatal de Guayaquil a la Asociación de Exportadores de Banano del Ecuador (A.E.B.E.), la internacionalización del producto no petrolero estrella del Ecuador data desde 1911, año en el cual se exportó a los mercados de Perú, Estados Unidos y Chile. Con el pasar de los años, la industria bananera creció rápidamente incentivada por la creciente demanda mundial (de Estados Unidos y Rusia principalmente), alcanzando en 1952 la categoría de primer país exportador de banano y plátano a nivel mundial [10]. En el periodo de 2004 a 2008 la participación promedio del banano en las exportaciones tradicionales ha sido del 56.53%, generando un ingreso de divisas al país, para dicho periodo de 6,265 millones de dólares. El sector bananero absorbe el 90% de la producción de la industria cartonera del país y el 60% de la facturación de las empresas que venden insumos agrícolas.

La producción bananera del país, se realiza en 20 provincias del territorio continental. La Costa aporta con el 89% de la producción nacional, Sierra con el 10% y el Oriente con el 1%. Se produjo en 1998 un total de 4'226.200 toneladas métricas. En la Costa, las provincias con mayor productividad son Los Ríos con el 35% y el Guayas con el 32% de la producción total. En la Sierra, las regiones cálidas de las provincias del Cañar la producción es del 3.8%, la provincia de Bolívar con el 1.8%, Santo Domingo de los Tsáchilas con el 1.4% y Loja con el 0.8% de la producción nacional [11]. En el país existen cerca de 5000 productores de banano, y de acuerdo al tamaño de la plantación,

el 80% corresponden a propiedades menores de 30 hectáreas y tan sólo el 3% a mayores de 100 hectáreas.

A pesar de que el banano es un alimento de alto poder vitamínico y nutricional, y de su importancia económica, ya que junto con el petroero ocupa los primeros puestos en generación de divisas al país, el uso de cantidades considerables de plaguicidas para el combate de “*Sigatoka Negra*” puede provocar presencia de residuos tóxicos, constituyendo un riesgo toxicológico para consumidores, medio ambiente, así como posible pérdida de mercados y oportunidades comerciales [12].

La rápida expansión del cultivo de banano después de la crisis del cacao provocó la deforestación de grandes áreas de bosques tropicales. Por ser un monocultivo practicado en amplias extensiones, las bananeras requieren de aplicaciones frecuentes y en fuertes dosis de agroquímicos. Hace poco menos de 10 años, el cultivo del banano llegó a ser conocido a nivel internacional por la demanda presentada por agricultores de 11 países, incluido el Ecuador, en contra de un consorcio de multinacionales que producía y exportaba un agroquímico prohibido en Estados Unidos. Este nematocida, el *DBCP* (Dibromo Cloro Propano), causó la esterilidad de los trabajadores de las bananeras. Según la OMS este químico tiene una toxicidad aguda por sus efectos en la reproducción humana así como por su mutagenicidad y carcinogenicidad en animales. Además presenta toxicidad crónica ya que los impactos sobre la reproducción humana pueden perdurar, incluso después de terminarse la exposición. Los efectos ambientales del *DBCP* son graves ya que es un agente contaminante del suelo, del aire y del agua. Es un pesticida altamente persistente y móvil. Se descompone lentamente en el suelo y migra a través de ciertos estratos. Se lo ha encontrado en aguas subterráneas y superficiales 10 años después de su uso [13].

En las plantaciones de banano se realizan entre 15 y 20 ciclos de fumigación de fungicidas al año, y pueden durar de 7 a 10 días cada uno. Esta práctica, que se realiza a veces aunque el hongo no esté presente en las plantas de banano, acelera la resistencia de las plagas y enfermedades a los pesticidas. Los desechos de estas sustancias fluyen a los canales de drenaje de las plantaciones, provocan la contaminación de los ríos y tienen graves impactos ambientales, económicos y sobre la salud aguas abajo. En 1994 por ejemplo, la contaminación de las aguas por los fungicidas *Tilt* y *Callixin*, utilizados en las bananeras para combatir el hongo conocido como “*Sigatoka Negra*”, provocó la muerte de larvas de camarón y, por ende, graves repercusiones económicas en la zona costera [13].

1.3 Legislación de niveles de contaminación por pesticidas

Primeramente es necesario referirse a reglamentaciones internacionales como es el Código Internacional de Conducta para la Distribución y Utilización de Plaguicidas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma 2003 [14]. Uno de los objetivos del Código (Artículo 1, 1.1) dice “...establecer normas

de conducta de carácter voluntario para todas las entidades públicas y privadas que intervienen en la distribución y utilización de plaguicidas o tienen relación con las mismas, particularmente en los casos en que no hay una legislación nacional para regular los plaguicidas o la que existe es inadecuada” [14].

En el Ecuador las reglamentaciones se realizan a través del Ministerio de Agricultura y Ganadería mediante el Reglamento General de Plaguicidas y Productos Afines de uso Agrícola. Este reglamento se basa en aquellas normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud y la FAO. También es necesario referirse al Reglamento de Saneamiento Ambiental Bananero que se refiere claramente en su Capítulo V acerca de las Compañías Aplicadoras [15].

El Ministerio del Ambiente dispone de una reglamentación anotada en el *Libro VI: De la Calidad Ambiental* [15]. En el *Título VI* denominado *Régimen Nacional para la Gestión de Productos Químicos Peligrosos*, y en el *Anexo 2* denominado *Norma de Calidad Ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para los suelos contaminados*, se hallan las normas a seguir en Ecuador referente a la contaminación del suelo.

1.4 Planteamiento del problema

El desarrollo industrial y agrícola acompañado por el aumento poblacional, contribuyen cada vez más a la contaminación del medio ambiente, donde por ejemplo, el uso excesivo de agroquímicos tendientes a mejorar la producción, dañan los recursos naturales más importantes para el desarrollo de la vida en el planeta. El suelo sufre constantemente cambios en su forma y composición físico – química ya que cada vez se presta a satisfacer las necesidades de comodidad del hombre más que de otros seres vivos. Por otro lado el agua de los lagos, ríos y mares se han convertido en uno de los lugares de depósito de desechos naturales de la vegetación, desechos humanos y animales. Esto altera profundamente el ciclo de la vida de todo ser viviente en nuestro planeta. Curiosamente es el hombre el que contribuye más a este deterioro y tal vez es el que menos hace para remediarlo.

En la zona costera del Ecuador se halla la mayor producción bananera con el 89% de la producción total, en zona de la serranía el 10% y en la zona oriental 1%. Además el río Jubones atraviesa la Sierra y la Costa antes de desembocar sus aguas en el océano Pacífico, llevando consigo toda clase de desechos provocados y no provocados por el hombre. Este río atraviesa la zona bananera más grande del país, exponiéndose a la contaminación de agroquímicos especialmente durante los periodos de fumigación que oscilan entre 15 a 20 veces al año con tiempos de duración entre 7 a 10 días cada vez. Todo esto afecta principalmente la salud de los pobladores de las zonas de cultivo, cambia la calidad del agua superficial y subterránea de esas zonas, las plagas se vuelven más resistentes. De todas formas, siendo la fumigación una actividad sumamente

necesaria en la producción de banano, no significa que deban descuidarse otros aspectos como por ejemplo la salud humana, la biodiversidad, y el mismo suelo de cultivo.

El problema consiste entonces en monitorear la calidad del agua del río Jubones antes, dentro y fuera de la zona de cultivo, con el objetivo de realizar comparaciones de medidas mientras se realiza la fumigación, pero especialmente una vez terminadas las tareas de fumigación ya que antes se debe considerar un modelo adecuado de lixiviación que se ajuste al medio agrícola. La base de datos a conformarse con estas medidas deberá permitir conformar una distribución temporal y espacial de concentraciones en el agua del río de Nitratos, Oxígeno Disuelto y niveles de pH. Así mismo correlacionar estos datos con medidas de humedad relativa del aire, temperatura ambiental y luz solar.

Otro de los problemas a resolver es la selección de las zonas de medida, el número de puntos de muestreo, la cantidad de variables físicas a ser medidas, el tipo de sondas y sensores a utilizarse, la red de telecomunicaciones necesaria para transportar todos los datos generados, la frecuencia de las medidas con el objetivo de no perder información relevante, el número de sensores inalámbricos a utilizarse y su topología en cada zona de medida.

1.5 Objetivo

1.5.1 Objetivo general

Diseño de una red de telecomunicaciones mediante el uso de sensores inalámbricos y sondas químicas para un sistema de monitoreo de uso de pesticidas en zonas bananeras del Ecuador y su influencia en la contaminación del río Jubones.

1.5.2 Objetivos específicos

- Diseño de la red de telecomunicaciones en la banda de 2.4 GHz a lo largo del río Jubones en la provincia de el Oro de Ecuador, con una distancia de cobertura de aproximadamente 50 Km, y once nodos entre estaciones de monitoreo y repetidores.
- Selección de sensores inalámbricos y sondas químicas para medición *in situ* de los niveles de contaminación del agua del río Jubones.
- Definición de los requisitos de planificación de la red de sensores inalámbricos para el emplazamiento en zonas específicas de monitoreo de calidad del agua del río Jubones. Utilización del software Radio Mobile para la red de transporte y NS2 para el análisis de tráfico.

1.6 Fundamento teórico

En este apartado se tratarán algunos fundamentos teóricos correspondientes a las redes de monitoreo ambiental, sus componentes básicos, las variables típicas a medirse y los dispositivos electrónicos y físicos a utilizarse en estas estaciones.

1.6.1 Redes de monitoreo ambiental

El Monitoreo Ambiental se define como un “Sistema continuo de observación de medidas y evaluaciones para propósitos definidos; el monitoreo es una herramienta importante en el proceso de evaluación de impactos ambientales y en cualquier programa de seguimiento y control” [18]. Por lo tanto, el monitoreo ambiental no es un fin en sí mismo, sino un paso esencial en los procesos administración del ambiente.

Los objetivos de una red de monitoreo ambiental pueden ser muy diversos y dependen exclusivamente de las aplicaciones de la misma. Para el Ecuador por ejemplo, “El Sistema de Monitoreo Socio Ambiental, está enfocado a generar información, criterios, análisis y perspectivas que permitan evaluar y dar seguimiento a los procesos de sostenibilidad o no sostenibilidad”. El Sistema de Monitoreo está orientado a la evaluación de los elementos y flujos que determinan la sostenibilidad nacional, y de los aspectos sociales, políticos y económicos que explican su situación [19].

1.6.2 Componentes de una Red de Monitoreo Ambiental

Las redes de monitoreo ambiental son el resultado de la aplicación de programas ambientales. Algunos componentes importantes se muestran en la Figura 1.3.

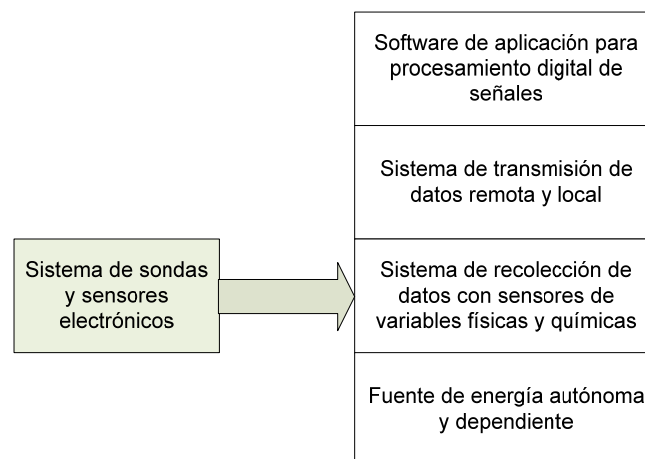


Figura 1. 3 Componentes de un Sistema de Monitoreo Ambiental.

En la Figura 1.3 se muestran los componentes básicos de un Sistema de Monitoreo Ambiental, cuenta con sistema de sondas y sensores que pueden estar colocados directamente en el sitio de medida, o en un laboratorio al que se han llevado previamente las muestras con los inconvenientes inherentes a este proceso. Este sistema envía datos al Sistema de Recolección de Datos que acondicionará las señales si fuera necesario y acoplará las mismas para el resto de los subsistemas de la Figura 1.3.

Los datos recopilados requieren ser tratados previamente para ser transmitidos a otras entidades locales o remotas encargadas del procesamiento digital y análisis estadísticos que fueren necesarios. Esta información es almacenada en una base de datos para su análisis exhaustivo. Existen muchas acciones posteriores a este último paso y depende fundamentalmente del objetivo para el cual fue instalada dicha estación de monitoreo.

1.6.3 Variables físicas a medirse

A continuación se describen algunas variables ambientales las cuales han sido agrupadas en áreas como hidrología, calidad del agua, suelos, biota [20]:

- ✓ **HIDROLOGÍA:** comprende el conjunto de procesos asociados con el ciclo del agua, éste puede dividirse en los siguientes:
 - *Régimen de flujo:* se refiere a las características físicas de flujo de un cuerpo en el agua que puede ser un río, arroyo o un lago.
 - *Régimen de crecidas o avenidas:* referido a los periodos de crecida pico, máximos, duración, frecuencias, volumen, etc.
 - *Nivel freático:* referido a niveles de aguas subterráneas y acerca de su disponibilidad y aprovechamiento.
 - *Zonas de recarga de acuíferos:* referidos a humedades en zonas altas de la cuenca o zonas bajas de los ríos.
- ✓ **CALIDAD DEL AGUA:** se refiere a la composición del agua en cuanto es afectada por sustancias producidas por procesos naturales o actividades humanas. Los criterios, estándares y objetivos dependerán del fin último, o sea si el agua es o no para consumo humano. Se pueden mencionar las siguientes:
 - *Concentración de sólidos:* referido a sólidos o minerales en suspensión. El tamaño de estos sólidos y sus características físico químicas determinan el tipo de impacto y su tratamiento.
 - *Sustancias tóxicas:* referido a todas las sustancias como desechos industriales, metales pesados, agroquímicos que pueden ser tóxicos a los seres vivos.
 - *Compuestos orgánicos, nutrientes y patógenos:* referido a compuestos como heces, sangre, y restos de animales, generan alta demanda de oxígeno (DBO), nutrientes como fósforo y nitrógeno. Se refiere también a organismos patógenos, como coliformes fecales y bacterias y virus como fuentes de transmisión de enfermedades.
- ✓ **SUELOS:** referido a actividades agrícolas y de minería.

- *Propiedades del suelo*: referido a las propiedades físicas como textura y densidad aparente. Químicas como el grado de acidez o alcalinidad o concentración de sales, especialmente para utilización agrícola del suelo.
- *Capacidad de uso del suelo*: referido al uso del suelo en agricultura, por ejemplo, la topografía, el clima, los requerimientos de cultivo.
- *Sedimentación*: referido al transporte y deposición de sedimentos, afectados por factores geológicos, hidrológicos y socioeconómicos.
- *Relieve, topografía y paisaje*: referido a irregularidades del terreno, el paisaje, la vegetación, presencia de animales y presencia de actividad humana.
- ✓ *BIOTA*: la desaparición de los bosques naturales conlleva la disminución de la bio-diversidad.
 - *Especies vegetales y animales*: referido a la composición de la flora y la fauna.
 - *Biodiversidad*: referido a diversidad biológica como la variedad de organismos vivientes y hábitats.

Existen otros factores como variables socio-económicas, cambios del uso del suelo, salud pública, etc.

1.6.4 Transmisión de datos

Todos los datos de las variables físicas detectadas, requieren ser transportadas a un sitio de recolección común para su posterior análisis, para esto intervienen todos los equipos electrónicos y mecánicos necesarios para la instalación de la infraestructura de telecomunicaciones a fin de transportar la información generada. Estos sistemas pueden ser a través de sistemas de radiocomunicaciones terrestres y satelitales. Se puede mencionar por ejemplo, la telefonía fija y móvil, radioenlaces en VHF, UHF y microonda.

Otro aspecto a considerar es la cantidad de datos que fluyen por la red de transporte, esto se relaciona directamente con la cantidad de estaciones de monitoreo y la cantidad de sondas y sensores utilizados. La capacidad de transporte de datos de la red dependerá la topología de la red, número de sensores y la frecuencia de medida de las variables.

1.6.5 Software de aplicación, Sistemas de Información Geográfica SIG

Un Sistema de Información Geográfica es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñados para capturar, almacenar, recuperar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada para la solución de problemas de planificación y gestión de sistemas de información geográfica [21].

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se halla asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía. El sistema SIG separa la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo interactuar con ellas fácilmente.

1.6.6 Sistema autónomo de energía eléctrica

Un sistema autónomo de energía eléctrica está constituido básicamente por un sistema fotovoltaico o por un sistema electrógeno. Para el primer caso es necesario paneles solares, reguladores de voltaje, inversores de voltaje, baterías, cables y accesorios. El sistema electrógeno está compuesto por motores a gasolina o diesel, baterías y alternadores. Estos sistemas pueden actuar en conjunto si fuera necesario para aumentar la autonomía del sistema de energía.

Las estaciones de monitoreo remoto que se hallan muy lejos de los poblados funcionan generalmente con sistemas autónomos fotovoltaicos. Estos sistemas son muy ventajosos respecto de los electrógenos ya que son autónomos, requieren poco mantenimiento y aprovechan la energía solar. Para el Ecuador la energía solar prácticamente es constante durante todos los meses del año, esto aumenta todavía más la autonomía de los sistemas autónomos de energía fotovoltaica.

1.7 Sensores Inalámbricos WSN

Una red inalámbrica consiste en varios dispositivos autónomos distribuidos de forma espacial que utilizan sensores para monitorear condiciones físicas y ambientales [22]. Estos dispositivos autónomos interactúan con ruteadores y gateways para crear una típica red de sensores inalámbricos. Los componentes de un WSN se hallan en la Figura 1.4.

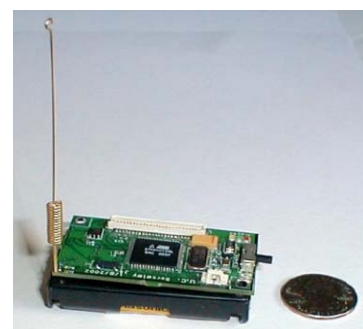
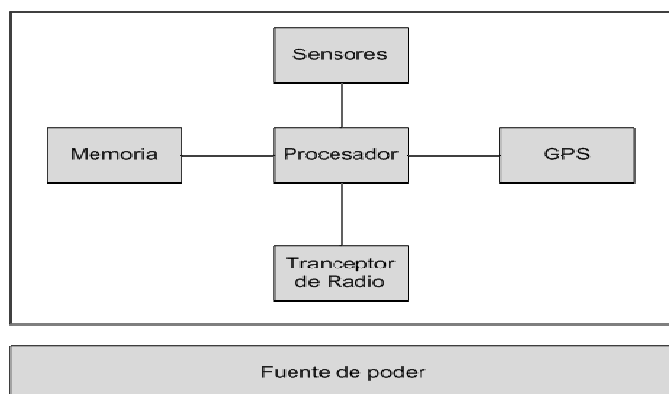


Figura 1. 4a) Esquema básico de un nodo sensor inalámbrico, b) Tamaño relativo del sensor con respecto a una moneda.

La Figura 1.4 muestra los componentes básicos de un Wireless Sensor Network (WSN). Un procesador básico, sensores de variables físicas ambientales, sistema de posicionamiento global GPS, un transceptor de radio para la comunicación inalámbrica y la fuente de poder. Son relativamente pequeños lo cual brinda muchas ventajas por cuestiones de espacio y consumen muy poca energía.

1.7.1 Procesador interno de baja potencia

Un sensor inalámbrico incluye procesamiento tanto para la información medida como para la información de comunicación de otros sensores. Los procesadores se hallan restringidos en potencia computacional y ejecutan sistemas operativos basados en componentes como por ejemplo TinyOS. Una red de sensores puede contener sensores con capacidades de cómputo distintas que incluyan técnicas de diseño de bajo consumo, por ejemplo modo de adormecimiento y escalamiento de voltaje dinámico para proveer un ahorro significativo de energía.

1.7.2 Memoria y almacenamiento

Disponen de almacenamiento en forma de acceso aleatorio y memorias de sólo lectura tanto para almacenamiento de información y para la ejecución de programas. Estas cantidades de memoria son limitadas en los dispositivos WSN, especialmente por consideraciones económicas.

1.7.3 Transceptores de Radio

Los WSN incluyen dispositivos de radio de baja velocidad y corto alcance (10-250 kbps, < 100m). Aunque en la actualidad se hallan limitados en capacidad, son factibles de mejorar con el tiempo en mejores costos, eficiencia espectral, inmunidad al ruido, desvanecimiento e interferencia. Las radiocomunicaciones en los WSN son las operaciones de mayor consumo energético, y por lo tanto, deben incluir modos de trabajo de adormecimiento (sleep-mode) para una mejor eficiencia energética y modo de despertarse o activación (wake-up).

1.7.4 Dispositivos Sensores

Ya que hay restricciones en ancho de banda y consumo energético, los WSN soportan principalmente el modo de medida a baja velocidad. El tipo de sensores utilizados dependen fundamentalmente de la aplicación: por ejemplo, pueden incluir sensores de temperatura, sensores de luz, sensores de humedad, sensores de presión, acelerómetros, magnetómetros, sensores químicos, sensores acústicos, o de imágenes de baja resolución.

1.7.5 Sistemas de Geoposicionamiento

En muchas aplicaciones de WSN, es importante disponer de medidas de localización. La manera más simple de obtener la posición es preconfigurar la localización del sensor

a ser desplegado, pero solamente en emplazamientos limitados. Particularmente para operaciones al aire libre, cuando la red está desplegada en forma *ad hoc*, la información se puede obtener más fácilmente vía GPS. Por lo tanto, en algunas aplicaciones, solamente una fracción de los nodos pueden estar equipados con GPS, reduciendo los costos totales. En este caso los otros nodos pueden obtener su localización mediante algoritmos de localización de red.

1.7.5 Fuente de poder para WSN

Para algunos emplazamientos de WSN se puede utilizar alimentación por baterías (por ejemplo, utilizando baterías LiMH AA). Pueden existir otros nodos de la red energizados vía cable, otros nodos utilizando técnicas de alimentación con energía renovable.

1.7.6 Topologías y aplicaciones de los WSN [23]

Desde el punto de vista de consumo energético de los WSN, éstos se clasifican en:

- 1.- Sensores para operaciones de bajo ciclo de trabajo.
- 2.- Sensores para procesamiento local y en red para reducir el volumen de datos (y por lo tanto el tiempo de transmisión).
- 3.- Redes multisalto que reducen los requerimientos de transmisión de alto rango ya que las pérdidas de propagación son una función exponencial directa de la distancia. Cada nodo en la red de sensores puede actuar como un repetidor reduciendo la potencia de transmisión.

Desde el punto de vista de *topología* se puede dividir a las redes de sensores en dos categorías:

- *Categoría 1 WSNs (C1 WSNs)*: casi siempre sistemas basados en malla con conexiones de radio **multisalto** o entre WNs (redes inalámbricas), utilizando ruteo dinámico tanto en porciones de red cableadas e inalámbricas. Generalmente las aplicaciones militares pertenecen a esta categoría.
- *Categoría 2 WSNs (C2 WSNs)*: generalmente son sistemas **punto a punto** o **multipunto a punto** (tipo estrella).

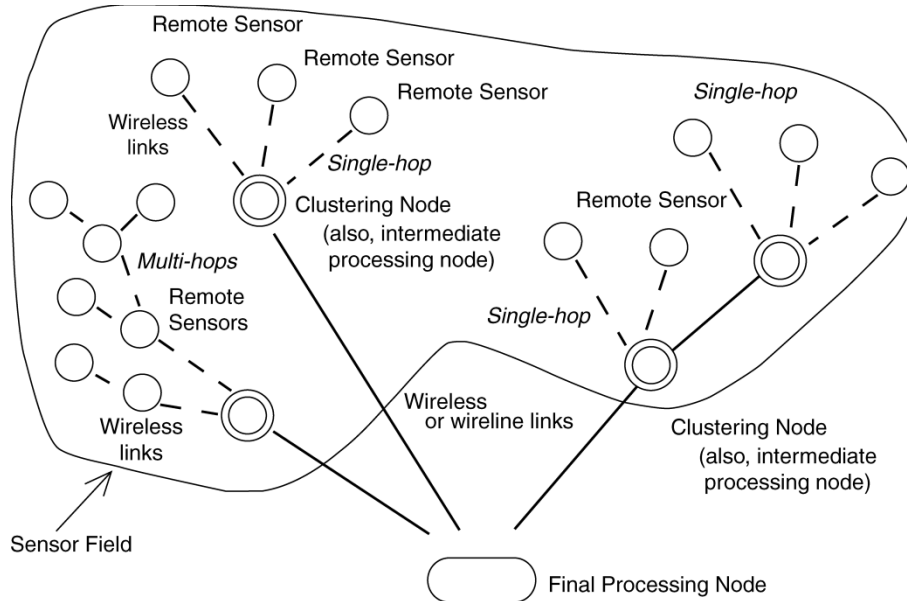


Figura 1.5 Arreglo general de redes de sensores [23].

En la Figura 1.5 se observa topologías tipo malla donde aparece un nodo que concentra el flujo de información generalmente en bases de datos a ser utilizados por otros sistemas como por ejemplo, sistemas de información geográfica (SIG).

El despliegue de una red de sensores y su topología correspondiente dependen del contexto de una aplicación, la región de operación, el conjunto de sensores inalámbricos, el cómo y dónde se van a localizar los nodos, cobertura, conectividad, costo de los equipos, limitaciones de energía, robustez, entre otros aspectos.

Entre las aplicaciones de los sensores inalámbricos se puede mencionar las siguientes:

- *Operaciones de socorro en casos de desastre:* se dejan caer sensores desde aeronaves para monitorear incendios forestales.
- *Cartografía de la biodiversidad:* utilización de nodos de sensores para observar la fauna silvestre.
- *Edificios y puentes inteligentes:* para reducción de consumo energético por aire acondicionado, ventilación, mediciones de temperatura, ocupación de habitaciones, flujo de aire, etc. Control de tensión mecánica después de terremotos o sismos.
- *Monitorización del hábitat:* para determinar la población y comportamiento de animales y plantas.
- *Monitorización del medio ambiente:* para observación del agua, suelo, aire, temperatura, luz, etc.
- *Detección de terremotos, inundaciones, incendios:* para monitoreo de prevención en zonas de alto riesgo.

- *Agricultura de precisión*: para monitoreo de maquinaria agrícola, medición de parámetros del suelo, del aire y de las plantas.
- *Control de tráfico*: para prevención de desastres en las vías.
- *Medicina y salud*: para realización de exámenes, diagnóstico y prevención de la salud.
- *Mantenimiento preventivo de maquinaria*: para monitoreo de variables físicas, valoración de funcionalidad de piezas electromecánicas.
- *Logística*: para identificación, localización y control de activos.
- *Telemática*: para proveer un mejor control de tráfico, obteniendo información más minuciosa acerca de las condiciones de tráfico.
- *Detección de contaminantes ambientales*: para determinar niveles de contaminación química en agua y aire.
- *Control de procesos industriales*: para monitoreo de procesos y control de producción.

Etc.

En los últimos años se realizan investigaciones acerca de los *biosensores* conocidos como instrumentos para la medición de parámetros biológicos o químicos. Se componen de tres partes fundamentales:

- *Sensor biológico*: puede ser un tejido, un cultivo de microorganismos, enzimas, anticuerpos, cadenas de ácidos nucleídos, etc. El sensor puede ser tomado de la naturaleza o ser un producto de la biología sintética.
- *El transductor*: acopla los otros dos elementos y traduce la señal emitida por el sensor.

El detector: puede ser óptico, piezoeléctrico, térmico, magnético, etc.

1.8 Estándar IEEE 802.15.4 [22]

El estándar IEEE 802.15.4 es un subgrupo de trabajo dentro del grupo IEEE 802 que se especializa en redes inalámbricas de área personal (wireless personal area networks, WPAN). Este grupo se divide en 5 subgrupos también [22].

Task Group 1: IEEE 802.15.1 (WPAN / Bluetooth)

IEEE 802.15.1 – 2002 desarrolla un estándar basado en la especificación versión 1.1 que incluye el nivel físico (PHY) y control de acceso al medio (MAC). Existe una versión actualizada en el 2005.

Task Group 2: IEEE 802.15.2 (Coexistencia)

IEEE 802.15.2-2003 desarrollada en el 2003 estudia los posibles problemas derivados de la coexistencia de WPANs con otros dispositivos inalámbricos que utilicen las bandas de frecuencia no reguladas, tales como redes inalámbricas de área local WLAN (Wireless Lan Area Network).

Task Group 3: IEEE 802.15.3 (WPAN de alta velocidad)

IEEE 802.15.3 – 2003 es un estándar que define los niveles PHY y MAC para WPANs de alta velocidad (11-55 Mbps).

Task Group 3a: IEEE 802.15.3a (PHY alternative para WPAN de alta velocidad)

IEEE 802.15.3a intentó realizar mejoras al nivel físico de la banda ultra ancha (Ultra Wide Band, UWB) para su uso en aplicaciones que trabajen con elementos multimedia. Realizó la consolidación de 23 especificaciones de PHY para UWB en dos propuestas utilizando multiplexación por división de frecuencias ortogonal multibanda (Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing, MB-OFDM) en UWB y UWB en secuencia directa (DS-UWB).

Task Group 3b: IEEE 802.15.3b (revision MAC)

IEEE 802.15.3b trabaja en el desarrollo de mejoras a 802.15.3 para refinar la implementación e interoperabilidad de MAC.

Task Group 3c: IEEE 802.15.3c (PHY alternative de onda milimétrica)

Este grupo (TG3c) se formó en marzo del 2005 y trabaja en el desarrollo de una PHY alternativa basada en ondas milimétricas para el estándar 802.15.3 – 2003.

Task Group 4: IEEE 802.15.4 (WPAN de baja velocidad)

IEEE 802.15.4 – 2003 (WPANs de baja velocidad, Low Rate WPAN) trata las necesidades de sistemas con poca capacidad de transmisión de datos pero con tiempos de vida útiles muy altas con alimentación limitada (con baterías) y una complejidad muy baja. Los protocolos ZigBee se basan en la especificación producida por este grupo de trabajo.

4a (PHY alternativa)

El principal interés de este grupo es permitir comunicaciones y facilidades de localización de alta precisión (de un metro y mejor), alta productividad agregada y necesidades energéticas extremadamente reducidas. También se busca la escalabilidad en las tasas de datos, distancias de transmisión, costes y consumo.

4b (Revisiones y mejoras)

Este grupo se inició con un proyecto de realización de mejoras y aclaraciones específicas sobre IEEE 802.15.4-2003. Entre estos objetivos se encuentran la resolución de ambigüedades y reducción de complejidad innecesaria, el incremento en

el uso de claves de seguridad, las consideraciones para el uso de nuevos rangos de frecuencias disponibles y otros aspectos.

1.8.1 Capa física PHY

Es muy importante conocer las características del canal inalámbrico ya que los sensores utilizan este medio para comunicarse. Existen algunos factores que afectan las comunicaciones como son la banda de frecuencias, la potencia de transmisión, el esquema de modulación, las características de construcción de los transceptores, el consumo de energía en la radiocomunicación, entre otros. Una diferencia entre las redes *ad hoc* y redes WSN es el ancho de banda y la modulación utilizada para el manejo de grandes volúmenes de datos.

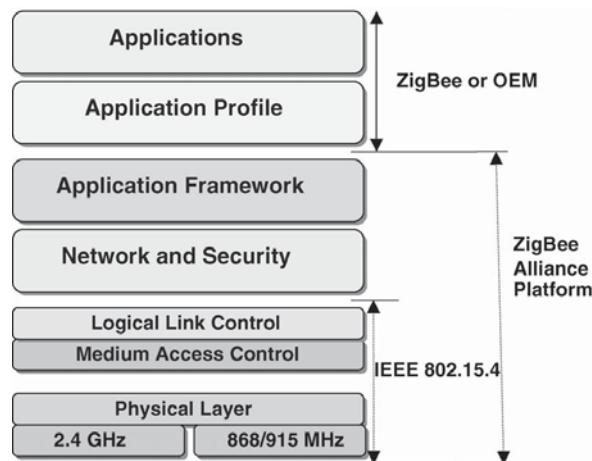
Las frecuencias de trabajo no son las mismas en todas las regiones. En la Tabla 1.1 se halla la descripción de las frecuencias, número de canales y velocidad de datos.

BANDAS DE FRECUENCIA	COBERTURA	CANALES	VELOCIDAD DE DATOS
2.4 - 2.4835 GHz	En todos los países	16	250 Kbps
902 - 928 MHz	Américas	10	40 Kbps
868 - 868.6 MHz	Europa	1	20 Kbps

Tabla 1.1 Frecuencias de trabajo para IEEE 802.15.4 – 2003.

En la Tabla 1.1 se describen las bandas de frecuencias de trabajo de los WSN para algunas partes del mundo. Se observa que a mayores frecuencias se tienen mayor ancho de banda de transmisión de datos. El uso de las frecuencias responde a cuestiones legales del uso del espectro radioeléctrico de cada país o región.

En la Figura 1.7 se halla la pila de protocolos del estándar 802.15.4-2003 que contiene la capa física (PHY), la capa de Control de Acceso al Medio (MAC) y la capa de red ZigBee de la cual se tratará más adelante [23].



(a)

Introducción

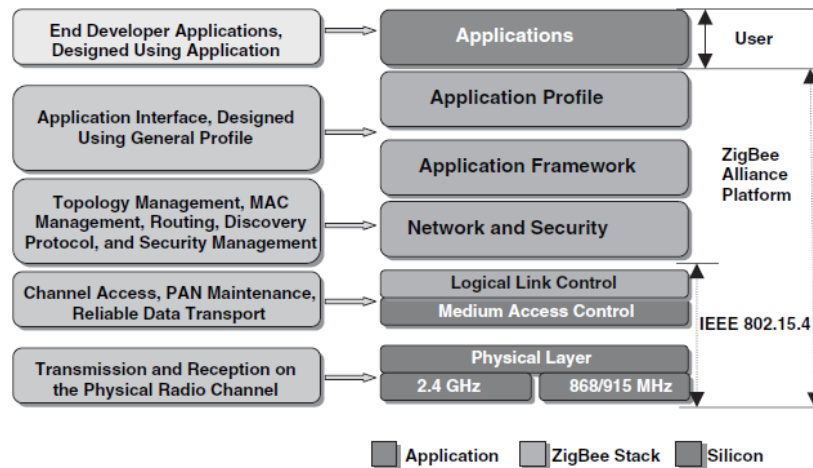


Figura 1. 6Estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee [23].

El estándar IEEE 802.15.4 se basa en el modelo de referencia OSI (Open System Interconnection) e involucra a la capa física, la capa MAC y la capa de control lógico de enlaces. La alianza Zigbee utiliza el estándar IEEE 802.15.4 al que se suma la capa de seguridad de la red, el marco de aplicaciones y el perfil de aplicaciones. Sobre todas estas capas, se halla el usuario.

La capa física (PHY) del modelo de referencia caracteriza los interfaces de los componentes de la red y sus operaciones. La capa física soporta las operaciones de la capa MAC, e incluye una variedad de características como por ejemplo la detección de energía del receptor, indicador de calidad del enlace, verificación de la claridad del canal. También especifica una variedad de operaciones de baja potencia, operaciones de ciclo de trabajo bajo, administración del consumo energético, y bajas tasas de transmisión. Algunos parámetros efectuados por la capa MAC se indican en la Tabla 1.2.

PARAMETRO	2.4 GHz PHY	868/915 MHz PHY
Sensibilidad	- 85 dBm	- 92 dBm
Nivel máximo de entrada en el Receptor	- 20 dBm	
Rechazo de canal adyacente	0 dB	
Rechazo de canal alterno	30 dB	
Potencia de salida, la más baja máxima	- 3 dBm	
Precisión de la modulación de transmisión	EMV < 35% para 1000 chips	
Número de canales	16	1/10
Espacio entre canales	5 MHz	NA*/2 MHz
VELOCIDAD DE TRANSMISION		
Velocidad de datos	250 kbps	20/40 kbps
Velocidad de símbolo	62.5 kilosímbolos/sec	20/40 kilosímbolos/sec

Chip rate	2 megachips/sec	300/60 kilochips/sec
Modulación de chip	O-QPSK con forma de pulso semisinusoide (MKS)	BPSK con forma de pulso coseno alzado
Tiempo de transmisión TX-RX y RX-TX	12 símbolos	

Tabla 1. 2 Principales parámetros de la capa PHY IEEE 802.15.4 [23].

La Tabla 1.2 muestra algunos parámetros importantes que son verificados por la capa física. Fundamentalmente tiene que ver con modulaciones, potencias de transmisión y recepción y velocidades para las distintas bandas de frecuencia.

La capa física fue diseñada debido a la necesidad de obtener principalmente una eficiencia energética de bajo costo. Operando en las bandas de frecuencias descritas en la Tabla 1.1, el estándar IEEE 802.15.4 define 3 medios físicos distintos:

- 1.- Espectro ensanchado de secuencia directa (*Direct-Sequence Spread Spectrum*), utiliza la modulación BPSK en las bandas de frecuencia de 868 MHz a la velocidad de 20 kbps.
- 2.- Espectro ensanchado de secuencia directa (*Direct-Sequence Spread Spectrum*), utiliza la modulación BPSK en las bandas de frecuencia de 915 MHz a la velocidad de 40 kbps.
- 3.- Espectro ensanchado de secuencia directa (*Direct-Sequence Spread Spectrum*), utiliza la modulación O-QPSK en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz a la velocidad de 140 kbps.

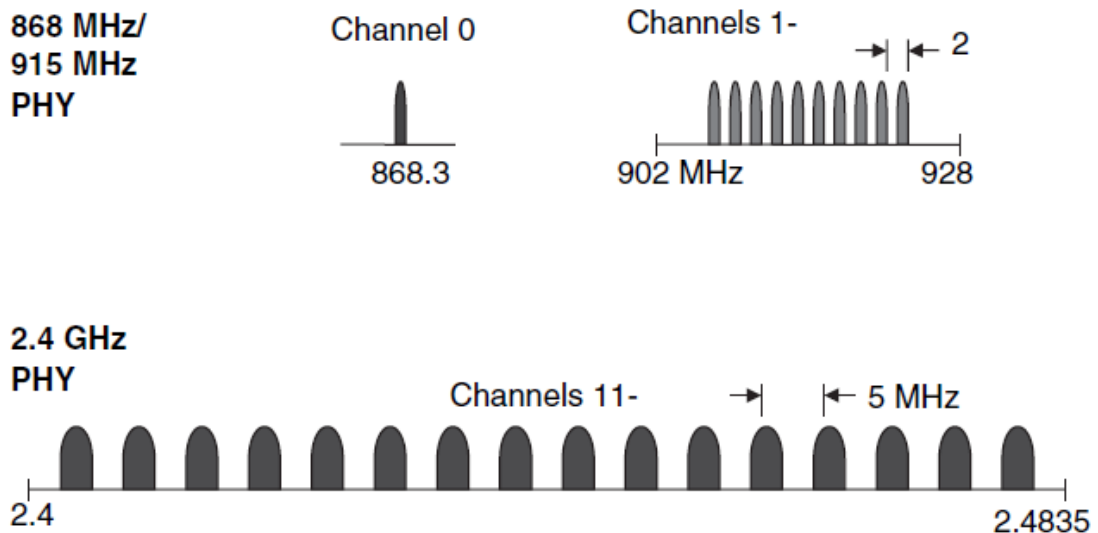


Figura 1. 7 Bandas de frecuencia de la capa física de IEEE 802.15.4 [23].

La Figura 1.7 muestra las bandas de frecuencias, los canales de comunicaciones y sus anchos de banda. A mayores frecuencias de comunicación, se obtienen mayor número de canales, lo cual visto desde un punto de vista es muy ventajoso.

La estructura de paquetes de la capa física se muestra en la Figura 1.8.

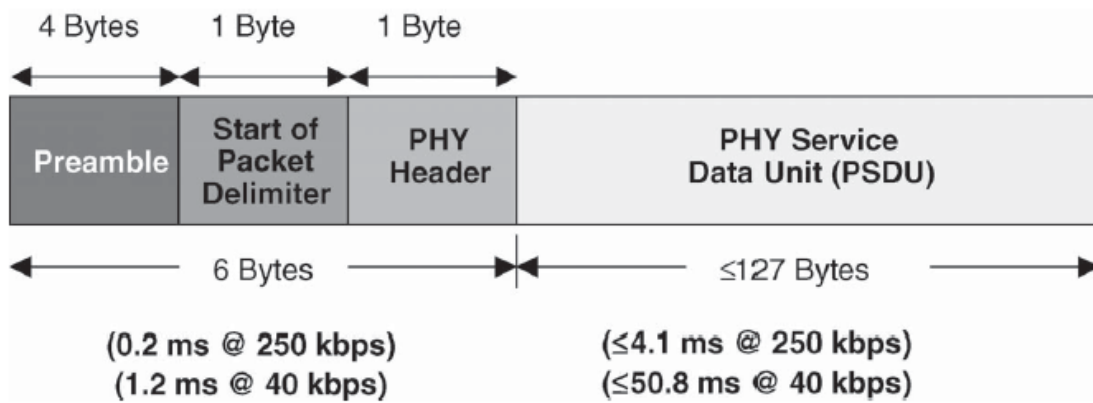


Figura 1. 8 Estructura del paquete de la capa física IEEE 802.15.4 PHY[23].

La Figura 1.8 muestra que el primer campo contiene 32 bits de preámbulo. Este campo se utiliza para sincronización de símbolos. El siguiente paquete indica el inicio de un delimitador de paquete, contiene 8 bits y se utiliza para sincronización de las tramas. El campo del encabezado PHY de 8 bits especifica la longitud de la unidad de servicio de datos PHY (PSDU). El campo PSDU puede transportar hasta 127 bytes de datos.

1.8.2 Capa de Acceso al Medio MAC

La capa MAC es responsable principalmente de proveer el mecanismo que controla el acceso al medio de comunicaciones compartido por otros usuarios. Las características específicas de un WSN determinan los requerimientos del protocolo MAC. No es práctico utilizar el protocolo MAC utilizado para otras redes inalámbricas. Esto se logra adaptando el MAC Ethernet al contexto diferente de una red de radio, reemplazando CSMA/CD por CSMA/CA.

Existen algunas dificultades para el buen funcionamiento del protocolo MAC. Por ejemplo, la imposibilidad de enviar y recibir paquetes al mismo tiempo, situaciones de interferencia en el receptor y que pueden cambiar según el transmisor, altas tasas de error en la información receptada. Se espera entonces unos requerimientos mínimos para la capa MAC como son un rendimiento alto, bajos gastos de energía, bajas tasas de error, buena eficiencia energética, manejo del apagado de dispositivos, etc.

Existen algunas opciones para acceder al medio inalámbrico, esto es a través de sistemas *centralizados* y *distribuidos*. Estos sistemas a su vez pueden funcionar en base a un calendario o programa preestablecido o en base a una demanda producto de la naturaleza de la aplicación.

En la Figura 1.9 se indican las opciones de ingreso al medio inalámbrico en una red de sensores inalámbricos.

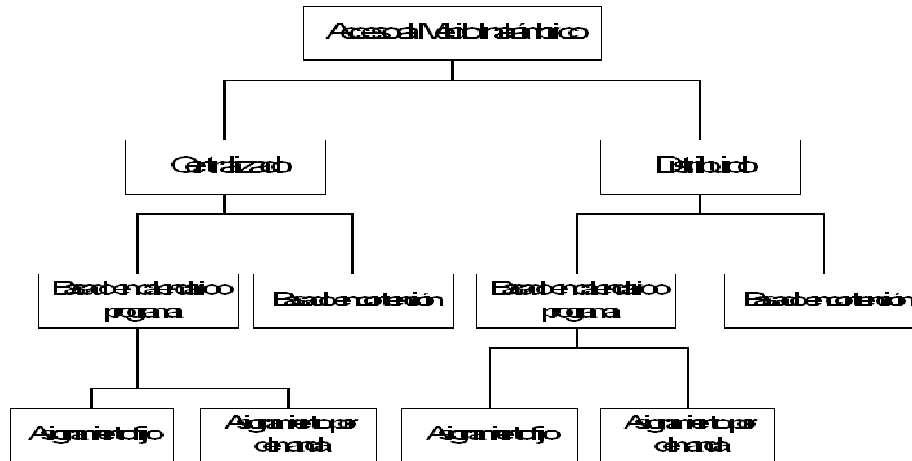


Figura 1.9 Opciones de acceso al medio inalámbrico en una red WSN.

La Figura 1.9 muestra fundamentalmente que existen dos opciones de acceso al medio:

- 1.- El modo centralizado basado en un programa preestablecido o basado en contención.
- 2.- El modo distribuido, así mismo basado en un programa preestablecido o basado en contención.

La especificación de la capa MAC de IEEE 802.15.4 fue diseñada para soportar gran número de aplicaciones industriales y aplicaciones caseras de control y monitoreo. Estas aplicaciones requieren bajas velocidades de datos y un moderado tiempo de retardo en las transmisiones. Esto ayuda a reducir la complejidad de la capa MAC. Se pueden mencionar entonces algunas características de la capa MAC:

- ✓ Soporta varias topologías de redes y dispositivos de redes.
- ✓ La posibilidad de una estructura de una super trama opcional para controlar los ciclos de trabajo de los dispositivos.
- ✓ Soporte para transmisión de datos directa e indirecta.
- ✓ Métodos de control de acceso al medio basados en contención y en calendarios.
- ✓ Modos de operación con baliza y sin baliza (En el modo con baliza, el protocolo utiliza la estructura de una super trama para coordinar el acceso al medio, igualmente el acceso basado en contención y garantiza la localización de ranuras de tiempo; en el modo sin baliza, el protocolo utiliza un modo de acceso CSMA/CA).
- ✓ Esquema de manejo de eficiencia energética para extender el tiempo de vida la batería, incluyendo periodos adaptivos de adormecimiento.

- ✓ Direccionamiento flexible para soportar el despliegue de redes de gran escala, teóricamente hasta 65000 nodos por red.

A continuación se explicarán las distintas clases de redes y su topología. Se describirán los dos modos de operación, con baliza y sin baliza.

Tipos de dispositivos y Topologías de Redes: el estándar IEEE 802.15.4 distingue dispositivos basados en la complejidad de su hardware y de su capacidad. Por lo tanto, el estándar define dos clases de dispositivos físicos: un dispositivo de funciones totales (Full-Function device, FFD) y un dispositivo de funciones reducidas (Reduced Function Device, RFD). El dispositivo FFD se halla equipado con capacidad de memoria para manejar todas las funcionalidades anotadas en el estándar. El dispositivo RFD es más simple que el FFD y tiene funciones reducidas, para obtener bajo costo y buena complejidad. Este dispositivo contiene típicamente interfaces físicos para módems inalámbricos.

Hay tres tipos de dispositivos lógicos:

1.- *Coordinador de red:* un dispositivo FFD es responsable del funcionamiento de la red y su control. El coordinador es responsable de escoger los parámetros de configuración de la red y dar inicio a la misma. También almacena información de la red y actúa como un repositorio por cuestiones de seguridad.

2.- *Router:* un dispositivo FFD que soporta funcionalidades de ruteo de datos, actúa como dispositivo intermedio para enlazar diferentes componentes de la red y enviar mensajes a través de múltiples saltos. Un ruteador puede comunicarse con otros ruteadores y sus dispositivos.

3.- *Dispositivos finales:* un dispositivo RFD que contiene funcionalidades suficientes para comunicarse con sus pares.

Basado en este tipo de dispositivos lógicos, las redes PAN (Personal Area Network) pueden organizarse en tres categorías: estrella, mallada (punto a punto) o grupo en árbol. Las topologías se indican en la Figura 1.10.

- PAN Coordinator
- Full Function Device (FFD)
- Reduced Function Device (RFD)

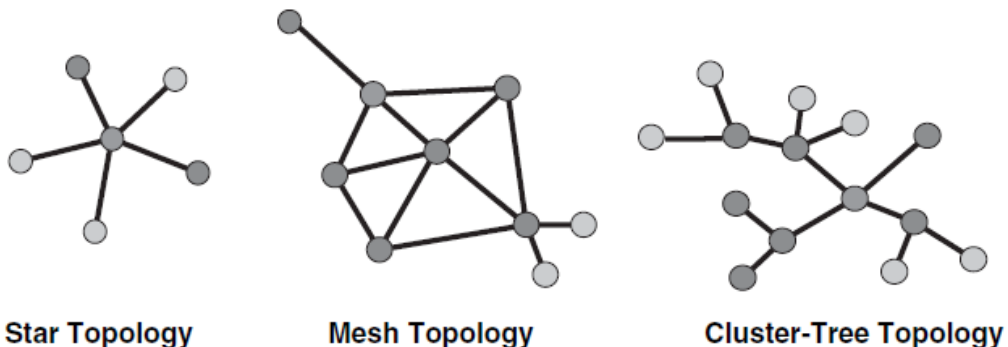


Figura 1. 10 Topologías de red [23].

La topología estrella soporta un solo coordinador con un máximo de 65536 dispositivos. En esta configuración, uno de los dispositivos FFD asume el rol de coordinador de la red. El resto de dispositivos actúan como equipos terminales. El coordinador se encarga de iniciar y mantener la comunicación. La configuración tipo malla permite la formación de caminos desde cualquier dispositivo origen hasta su destino utilizando algoritmos de ruteo tipo árbol y manejados por tablas. El algoritmo de ruteo manejado por tablas emplea una versión simplificada del algoritmo AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing).

La topología de agrupaciones tipo árbol habilita la red punto a punto con un mínimo de gastos de ruteo mediante multisaltos. Un agrupamiento tipo árbol está auto organizado y soporta redundancia de la red brindándole un alto grado de tolerancia a las fallas. El grupo (cluster) puede ser muy grande, llegando a ser hasta 255 subgrupos de hasta 254 nodos cada uno, para un total de 64770 nodos.

Cada red PAN se identifica únicamente por un identificador de 16 bits. Un coordinador PAN es el principal controlador de una WPAN (Wireless Personal Area Network). Un coordinador es un dispositivo de red configurado para soportar funcionalidades de la red y algunas responsabilidades que incluye:

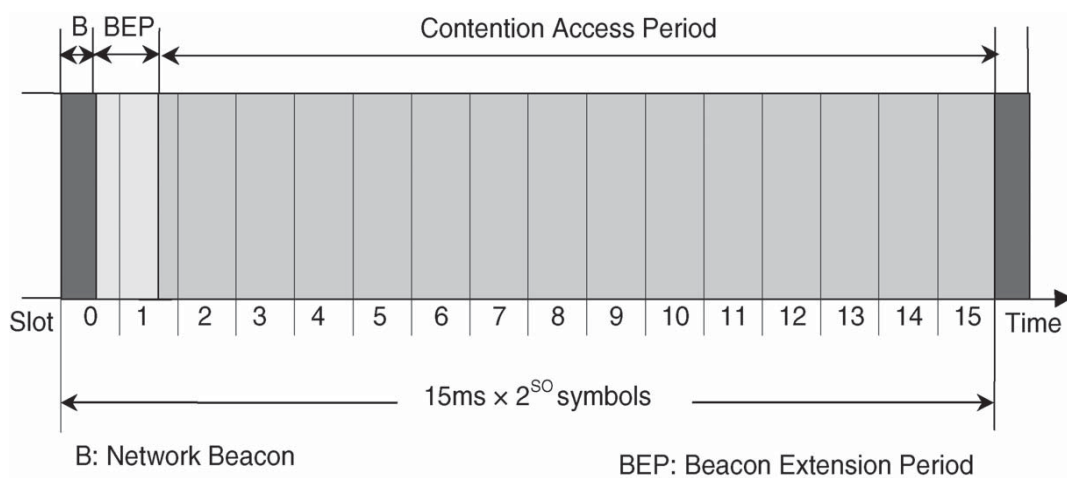
- Administrar una lista de todos los dispositivos de red asociados.
- Intercambiar datos de tramas con los dispositivos de la red.
- Localizar direcciones cortas de 16 bits al dispositivo de red (las direcciones cortas asignadas bajo demanda, se utilizan por los dispositivos asociados en lugar de la dirección de 64 bits para comunicaciones con el coordinador).
- Generación de tramas tipo baliza en periodos básicos (estas tramas se utilizan para anunciar el identificador PAN, lista de tramas de salida, y otros parámetros del dispositivo de la red).

Estructura de la Super trama: el estándar IEEE 802.15.4 define la estructura de una super trama opcional, que es inicializada por el coordinador PAN, por lo tanto su formato se define en el coordinador. Se divide en 16 ranuras de tiempo similares. La primera ranura se utiliza para transmitir la baliza. El principal propósito de la baliza es sincronizar los dispositivos añadidos, identificar la PAN, y describir la estructura de la super trama. El resto de las ranuras de tiempo son utilizadas por los dispositivos que compiten por las comunicaciones durante el periodo de acceso por contención (Contention Access Period, CAP). El dispositivo utiliza el protocolo CSMA-CA para ganar el acceso a la competencia de las ranuras de tiempo.

Para satisfacer los requerimientos de latencia y ancho de banda de las aplicaciones soportadas, el coordinador PAN puede establecer grupos de ranuras de tiempo contiguas para activar la super trama de las aplicaciones. Estas ranuras están etiquetadas como ranuras de tiempo garantizadas (Guaranteed Time Slots, GTS) y no pueden sobrepasar de siete. Por lo tanto los GTS forman el periodo libre de contención (Contention Free Period, CFP). Como aparece en la Figura 1.12 b), el CFP siempre aparece al final de la super trama activa y se inicia al comienzo de la siguiente CAP. La ranura de tiempo CAP mantiene el acceso basado en contención entre nodos en red y nuevos dispositivos que desean acceder a la red.

Los dispositivos de red que requieren localización GTS, pueden enviar requerimientos durante el periodo CAP para reservar un número deseado de ranuras de tiempo contiguas. Las solicitudes de ranuras pueden ser para recepción o de transmisión. Las ranuras de recepción son utilizadas por el dispositivo para buscar datos desde el coordinador, mientras que la ranura de transmisión se utiliza para enviar datos al coordinador. Los dispositivos que no tienen datos para intercambiar pueden apagar su energía e irse al estado de adormecimiento. Los dispositivos están esperando mantenerse activos, durante sus GTS localizados. Los dispositivos intentan ir al modo de adormecimiento durante el resto de los GTSs.

Para reducir el consumo energético, el coordinador también puede emitir una super trama conteniendo tanto el periodo activo y libre, como se muestra en la Figura 1.11 c). El periodo de actividad compuesto por 16 ranuras de tiempo, contiene la baliza de la trama, la ranura de tiempo CAP. El periodo de inactividad define un periodo de tiempo hasta en el que todos los nodos, incluyendo el coordinador, pueden ir al modo de adormecimiento. En este modo, el dispositivo de red cambia su energía y fija un temporizador para despertarse inmediatamente antes de anunciar la próxima trama tipo baliza. Dependiendo de la actividad de la red, el tipo de dispositivos conectados a la red, y la naturaleza de la aplicación soportada por la red, la longitud del periodo de inactividad varía y puede ser fijada a cero.



(a)

Introducción

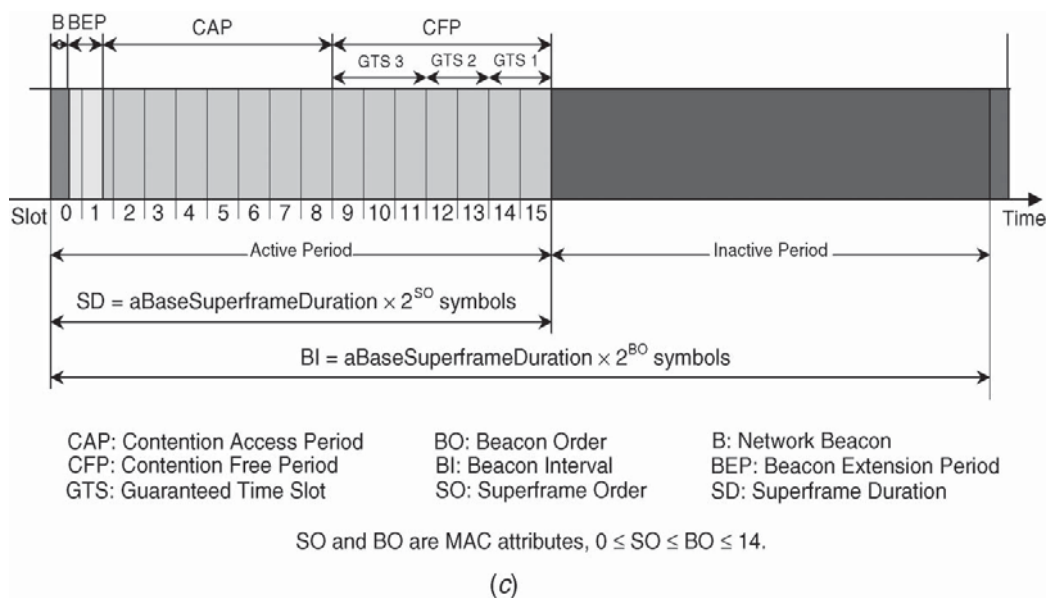
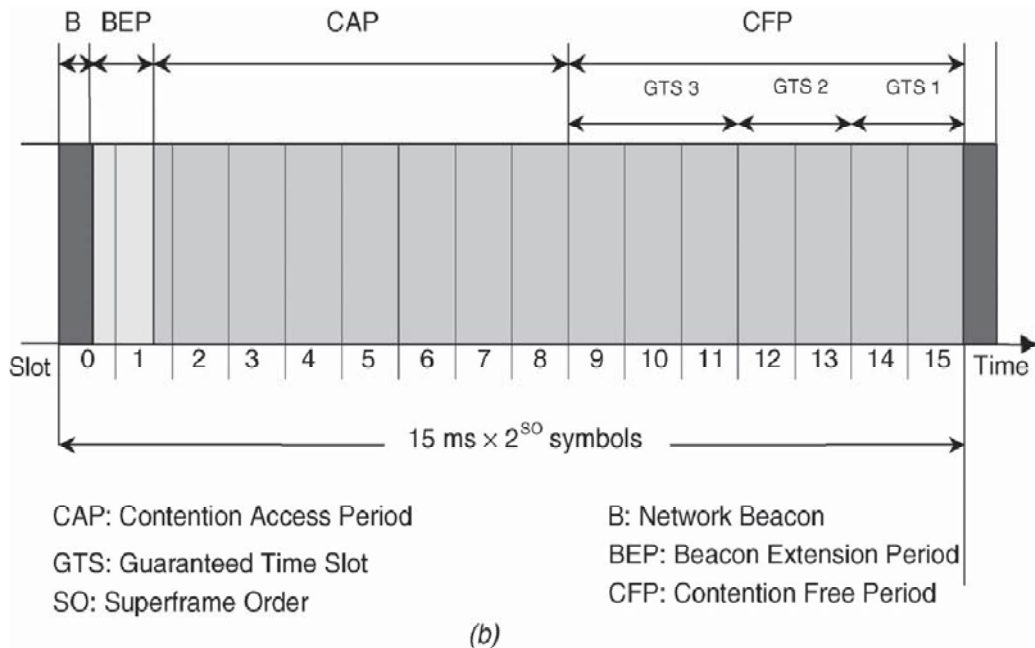


Figura 1. 11a) Estructura de Super Trama, b) Estructura de la trama QoS, c) Estructura de la Super trama con ahorro de energía [23].

Tipos de tramas: la estructura general de la MAC se encuentra en la Figura 1.12, tiene tres componentes básicos: cabecera MAC (MAC header), carga MAC (MAC payload) y pie de la MAC (MAC footer). El MAC header contiene un campo de trama de control y

Introducción

Octets:	1	0/	0/2/	0/	0/2/	Variabl	2
Frame Control	Sequence number	Destinatio n PAN	Destinatio n	Source PAN Identifier	Source Address	Frame Payload	Frame Check Sequence
		Addressing					
MAC						MAC Payload	MAC Footer

Bits: 0-	3	4	5	6	7-	10-	12-	14-
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	Ack Request	Intra PAN	Reserved	Destination Addressing Mode	Reserve	Source Addressing Mode

Frame Type Value b ₀ b ₁ b ₂	Description
0 0 0	Beacon
0 0 1	Data
0 1 0	Acknowledgement
0 1 1	MAC Command
1 0 0-1 1 1	Reserved

(a)

Octets:2	1	4 or 10	2	Variable	Variable	Variable	2
Frame Control	Beacon Sequence Number	Source Address	Superframe Spec	GTS Fields	Pending Address Fields	Beacon Payload	Frame Check Sequence
	MAC Header			MAC Payload			MAC Footer

Superframe Specification

Bits: 0-3	4-7	8-11	12	13	14	15
Beacon Order	Superframe Order	Final CAP Slot	Battery Life Extension	Reserved	PAN Coordinator	Association Permit

Extension

GTS Fields		
Octets: 1	0/1	Variable
GTS Spec	GTS Directions	GTS List

Pending Address Fields	
Octets: 1	Variable
Pending Address Spec	Address List

GTS Specification		
Bits: 0-2	3-6	7
GTS Descriptor Count	Reserved	GTS Permit

GTS Directions	
Bits: 0-6	7
GTS Directions Mask	Reserved

GTS List		
Bits: 0-15	16-19	20-23
Device Short Address	GTS Starting Slot	GTS Length

(b)

Data Frame Format

Octets:2	1	4 to 20	variable	2
Frame Control	Data Sequence Number	Address Information	Data	Frame Check Sequence
MAC			MAC Payload	MAC Foote

Acknowledgement Frame Format

Octets:	1	2
Frame Control	Data Sequence Number	Frame Check Sequence
MAC		MAC Foote

(c)

Octets:	1	4 to	1	variabl	2
Frame Control	Data Sequence	Address Information	Command	Command	Frame Check Sequence
MAC			MAC		MAC foote

Command Frame Types

Command Frame Identifier	Command Name	RFD	
		Tx	Rx
0 x 01	Association Request	X	
0 x 02	Association Response		X
0 x 03	Dis-association Notification	X	X
0 x 04	Data Request	X	
0 x 05	PAN ID Conflict Notification	X	
0 x 06	Orphan Notification	X	
0 x 07	Beacon Request		
0 x 08	Coordinator Realignment		X
0 x 09	GTS Request		
0 x 0a – 0	Reserved		

(d)

Figura 1. 12a) Formato general de la trama MAC, b) formato de la trama Beacon, c) formato de la trama de Datos y Acknowledgment, d) formato de la trama de comandos MAC (continuación) [23].

el campo de direccionamiento. El campo de control lleva el tipo de trama y otra información necesaria para la operación y control de la red. El direccionamiento

especifica el identificador del PAN fuente, la dirección del nodo fuente, el identificador del destino PAN, y la dirección destino. El MAC payload contiene los datos de la trama a ser intercambiados entre los dispositivos en comunicación. El MAC footer contiene el campo de chequeo de secuencia de la trama. Este campo se utiliza para detectar errores.

El IEEE 802.15.4 define cuatro tipos básicos de tramas: la trama tipo baliza (beacon), la trama de datos, la trama de reconocimiento (acknowledgment), y la trama de comandos MAC. La trama beacon se transmite periódicamente por el coordinador. Esta trama sirve para muchos propósitos, incluyendo el identificador de la red y su estructura, despertando a los dispositivos de su estado de adormecimiento y pasándolos al modo de escucha, y sincronizando sus operaciones con la red. La trama beacon es muy importante en las topologías tipo grupo-árbol y tipo malla. Mantiene todos los nodos sincronizados sin que los nodos se hallen despiertos por largos periodos de tiempo, de esta manera se reduce el consumo energético y se extiende la vida de la batería. La trama beacon y sus campos se hallan descritos en la Figura 1.12 b).

La *trama de datos* lleva una carga de hasta 104 octetos. Cada trama lleva un número de secuencia que identifica a la trama de manera única. Este número de secuencia asegura que todas las tramas se hallan contabilizadas y se recibirán en orden. El campo PCS se utiliza para detectar errores de trama.

La *trama de reconocimiento* se utiliza para recibir una contestación de haber recibido la trama de datos. La recepción de este reconocimiento en el transmisor de datos constituye una confirmación de que la trama de datos correspondiente ha sido recibida sin errores y en orden. Una trama de datos y su correspondiente trama de reconocimiento se explica en la Figura 1.12 c).

La *trama de comandos MAC* se utilizada en diferentes dispositivos para negociación y comunicación. Esta trama provee el mecanismo para manejar una red centralizada para controlar y configurar dispositivos remotamente, independientemente del tamaño de la red y su topología. Algunos comandos permiten la asociación y separación de solicitudes, requisitos de datos, notificación de conflictos de identificación de las ID PAN, notificaciones de orfandad, solicitud de beacon, solicitud de GTS, y reajuste del coordinador. Esta trama de comandos MAC se halla en la Figura 1.12 d). Sobre la recepción de una trama, la capa MAC debe procesar la trama recibida para determinar las acciones requeridas para manejar la trama apropiadamente. Para proveer suficiente tiempo para realizar este trabajo, la capa MAC requiere de un espacio entre tramas (Interframe Spacing, IFS) insertado entre tramas consecutivas. La duración del IFS depende de si fue reconocida o rechazada la transacción.

Modos de operación: el estándar IEEE 802,15.4 MAC se ha diseñado para atender distintos requerimientos de tráfico, cada uno caracterizado por el perfil de datos y requerimientos de latencia. Basado en sus características, el estándar define tres tipos de tráfico: datos periódicos, datos intermitentes, datos de baja latencia repetitiva.

Datos periódicos: presentes en aplicaciones de los sensores inalámbricos, donde el sensor alterna entre estado activo e inactivo.

Datos intermitentes: debido a aplicaciones en base a estímulos.

Datos repetitivos de baja latencia: definido por aplicaciones críticas como por ejemplo sistemas de seguridad y monitoreo. Este tipo de aplicaciones requieren de localización de ranuras de tiempo para garantizar el acceso al canal con su latencia y tolerancia. El estándar especifica modos de operación con beacon y sin beacon.

Modo de operación con Beacon: este modo permite a los dispositivos con una red extendida, como una red malla o tipo árbol, sincronizar sus acciones y coordinarlas comunicaciones con cada uno. Los dispositivos se despiertan solamente cuando se difunde el beacon.

Localización GTS: para reservar el intercambio de datos, un dispositivo envía una solicitud explícita al coordinador de la red, especificando el tipo, es decir si es de transmisión o recepción, y el número de ranuras de tiempo contiguas deseadas. La ranura de transmisión se utiliza para enviar datos al coordinador, la de recepción por otro lado, expresa la voluntad del dispositivo para recibir datos desde el coordinador.

Acceso al canal basado en contención: el acceso al medio durante CAP de un periodo activo se regula mediante protocolos de hardware CSMA ranurados. No usa mecanismos, como RTS/CTS.

1.9 Estándar IEEE 802.15.4 / ZigBee

La mayoría de la industria de dispositivos inalámbricos se ha enfocado en fabricarlos con un alto throughput, aunque las aplicaciones solamente requieren una simple conectividad inalámbrica, consumo bajo de energía, una velocidad binaria de acuerdo a la aplicación, corto alcance, y de bajo costo entre otros. La Alianza ZigBee es una organización con una misión de definir un estándar global y abierto que sea confiable, económico, eficaz, de bajo consumo, con capacidad de interconexión inalámbrica y control de seguimiento de información. ZigBee no es una tecnología, sino un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas fácilmente.

1.9.1 Clases de redes inalámbricas de corto alcance

Las redes inalámbricas de corto alcance se dividen en dos categorías: WLAN's y WPAN's.

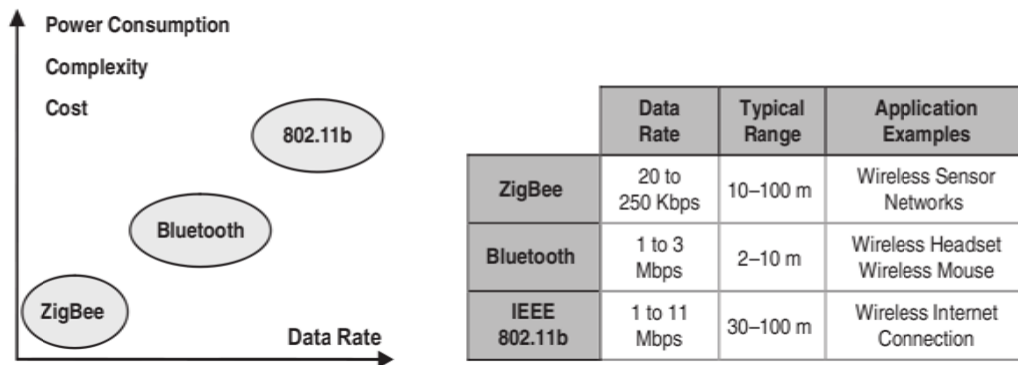


Figura 1. 13Comparación de estándares ZigBee, Bluetooth, IEEE 802.11.

La Figura 1.13 muestra tres tecnologías inalámbricas con sus rangos de distancia de cobertura y sus tasas de transmisión de bits por segundo.

El objetivo de WLAN es maximizar el alcance y tasa de transferencia de datos, en contraste WPAN no se desarrolló para reemplazar ninguna red LAN, se creó más bien para proveer eficiencia energética a cortas distancias con tasas de transferencia bajas.

1.9.2 Relación entre ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4

Una de las maneras comunes para establecer una red de comunicaciones (cableadas o inalámbricas) es utilizar el concepto de capas de red. Cada capa es responsable de ciertas funciones en la red. Las capas del protocolo de red inalámbrica ZigBee se muestran en la Figura 1.14.

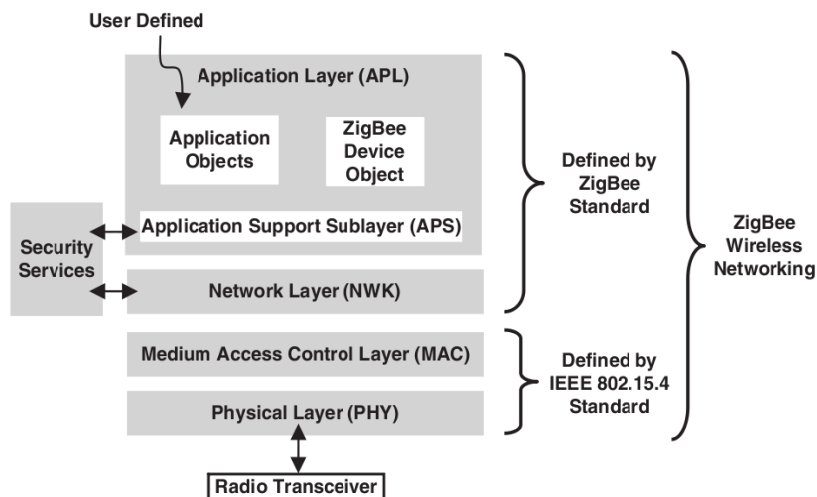


Figura 1. 14Capas del protocolo de red inalámbrica ZigBee

El protocolo ZigBee está basado en el modelo de referencia básico OSI (Open System Interconnect). El desarrollo de aplicaciones en las capas más bajas es independiente de la aplicación. Las dos capas inferiores PHY y MAC fueron desarrolladas por IEEE 802

y liberadas en el 2003. El estándar ZigBee define solamente las capas de red, aplicación y seguridad. IEEE 802.15.4 fue desarrollado independientemente del estándar ZigBee, y es posible construir redes inalámbricas de corto alcance basadas solamente en IEEE 802.15.4 y que no implementen las capas de ZigBee. En este caso los usuarios deberán desarrollar sus propias aplicaciones de red.

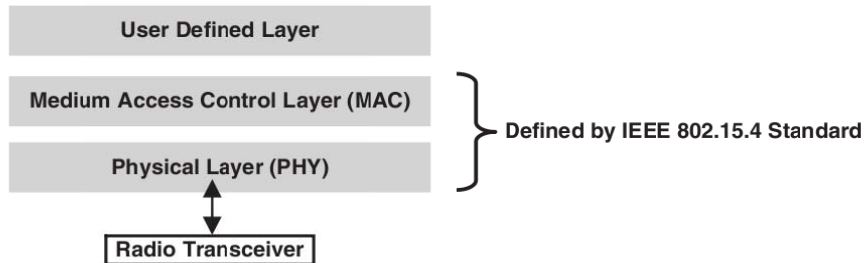


Figura 1. 15 Protocolo de red basado en IEEE 802.15.4 que no contiene el estándar ZigBee.

La Figura 1.15 muestra las dos capas fundamentales Física y MAC del estándar IEEE 802.15.4 liberado en el 2003 que no contiene por supuesto a ZigBee. Todo lo que está por encima de estas dos capas corresponde a definiciones de usuarios como por ejemplo la alianza ZigBee. Una ventaja de los productos basados en ZigBee es la interoperabilidad.

1.10 Sistema de Monitoreo Inalámbrico

Un sistema de monitoreo está compuesto por una cantidad de dispositivos localizados en sitios remotos y permite verificar y controlar datos desde la pluralidad de los dispositivos de medición. Puede trabajar con una variedad de protocolos en un conjunto de aplicaciones que permiten las comunicaciones entre componentes para una adecuada conformación de bases de datos que será explotada por subsistemas posteriores. Entre los componentes que forman parte de este sistema se hallan los sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores de variables físicas, transeptores, sistemas de información geográfica, etc.

Introducción

PARTE II
METODOLOGÍA

PARTE II

METODOLOGÍA

Materiales y Métodos

En este capítulo se indicarán los materiales necesarios para la implementación de la red de monitoreo de pesticidas. Se estudiarán las sondas de Nitratos, Oxígeno Disuelto y de niveles de acidez (pH) de las aguas de río, analizando sus especificaciones técnicas como principios de medición, rangos de medición, condiciones ambientales, dimensiones, peso, durabilidad, etc. También se estudiarán los sensores inalámbricos con sus distintos componentes como transceptores de radio, tarjetas de adquisición de datos, sensores de humedad relativa, temperatura ambiental y luz solar. Se especificarán otros componentes como transceptores en la banda de 2.4 GHz, amplificadores de radiofrecuencia, antenas y sistemas autónomos de energía eléctrica.

Primeramente se analizarán las zonas bananeras del Ecuador más expuestas al uso de agroquímicos, se escogerá la más importante sobre la que se realizará el monitoreo. Se definirán los puntos de monitoreo a lo largo del río y por último se decidirá acerca del número de nodos, su topología y la cantidad de variables a medirse.

2.1 Agricultura de precisión y redes de sensores inalámbricos

La Agricultura de Precisión es un método para estimar, evaluar y entender los cambios que se producen en los cultivos, con el objeto de poder determinar con exactitud las necesidades de riego y de fertilizantes, las fases de desarrollo y de maduración de los productos, los puntos óptimos de siembra y de recolección, etc. Es decir, predecir adecuadamente las distintas etapas de producción de los cultivos. Para ello, es importante obtener toda la información posible del agua, del suelo, de las plantas y del ambiente. Así, la agricultura de precisión hace uso de numerosas tecnologías e infraestructuras: los sistemas de instrumentación y adquisición de datos, los sistemas de información geográfica (SIG), los sistemas de posicionamiento global (GPS), la microelectrónica, las tecnologías inalámbricas, etc. [17].

Se entiende por precisión a la capacidad que ofrecen estos sistemas para aceptar nuevos y continuos desarrollos tecnológicos con los cuales se puede gestionar mejor la producción. La gestión de zonas agrícolas en agricultura de precisión involucra actividades de monitorización, necesidades de riego y de fertilizantes, fases de desarrollo y de maduración de los productos, los puntos óptimos de siembra y de recolección, sistemas de información que permitirán la toma de decisiones de ciertas acciones propias de agricultura. Las acciones pueden ser por ejemplo técnicas agrícolas específicas para cada vegetal o zonas particulares de cultivo, sistemas de riego, fertilización o uso de pesticidas.

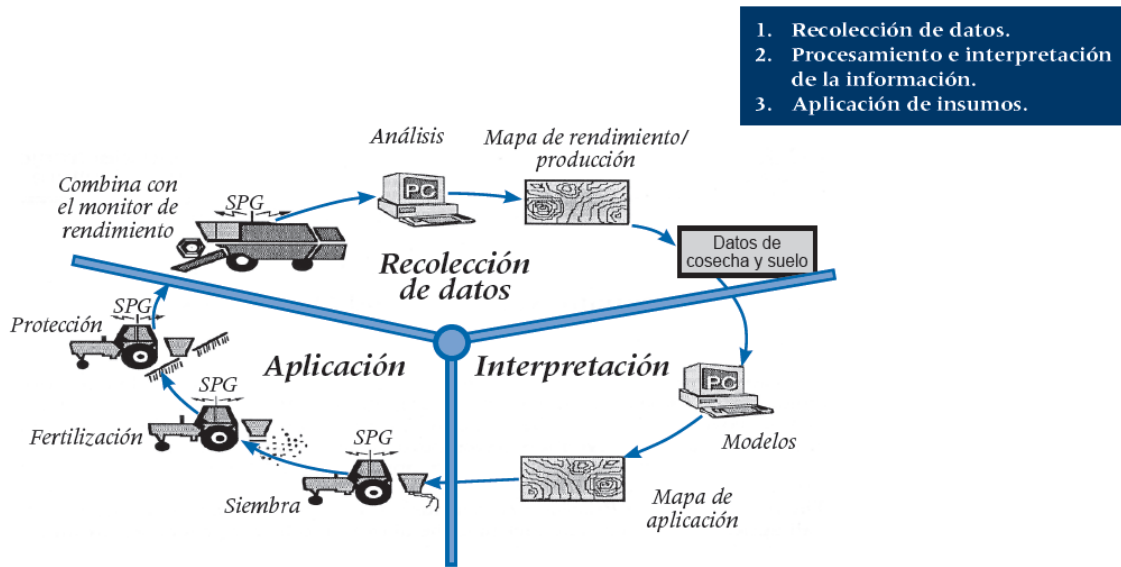


Figura 2. 1Facetas de la agricultura de precisión [17].

La Figura 2.1 muestra las tres facetas básicas de la agricultura de precisión:

- *Recolección de datos:* es la recepción de todos los datos necesarios para una aplicación determinada. La naturaleza de las variables a ser medidas, determinará las características técnicas de las sondas y sensores a ser utilizados.
- *Procesamiento e interpretación de la información:* esta etapa es tan importante como las otras con la particularidad de que se requiere personal experto en el área agrícola para la aplicación de modelos propios de esta rama, de manera que se obtengan buenas decisiones en la parte de gestión agrícola.
- *Aplicación de insumos:* es uno de los objetivos de la aplicación de las nuevas tecnologías electrónicas, ya que una dosificación consciente de agroquímicos reducirá los riesgos de contaminación.

Por tanto, la agricultura de precisión no sería posible sin la intervención de tecnologías electrónicas, que permitan realizar las mediciones de todas las variables físicas y químicas del suelo y del medioambiente. Estas variables requieren ser recolectadas y transmitidas generalmente a largas distancias, para luego ser procesadas a fin de obtener información valiosa para los técnicos en procesos agrícolas.

Las redes de sensores inalámbricos (WSN, Wireless Sensor Networks) corresponden a una de tantas tecnologías electrónicas, que hacen posible el monitoreo y control en tiempo real de muchas variables físicas en grandes zonas agrícolas.

2.2 Zonas de cultivo de banano y contaminación de ríos por pesticidas

En Latinoamérica y el Caribe el banano es la fruta tropical más cultivada y una de las cuatro más importantes en términos globales, sólo por detrás de los cítricos, la uva y la manzana. Los países latinoamericanos y del Caribe producen la mayoría del producto que entran en el comercio internacional. La oferta mundial del banano se halla distribuida en [25]:

- ✓ 36% por parte de Costa Rica.
- ✓ 30% por parte de Ecuador.
- ✓ 12% por parte de Filipinas.
- ✓ 9% por parte de Colombia.
- ✓ 13% corresponde a otros países.

La producción bananera en el Ecuador contribuye con el 24% al PIB agrícola. Las exportaciones de banano representan el 4% del PIB total, constituyen el 26% de las exportaciones primarias, el 33% de las no petroleras y el 66% de las tradicionales. Cerca del 12% de la población está involucrada directa e indirectamente con la actividad bananera [21]. Dentro de las exportaciones de banano o plátano, existen dos productos que se exportan en mayores cantidades (en el periodo 2004-2008) que corresponden a “*Banano fresco tipo ‘Cavedish valery’*” y “*Banano fresco tipo ‘plantain’ (plátano para cocción)*”, sus tasas de participación son 96% y 3% respectivamente [26].

En base a la información proporcionada por la Subsecretaría del Litoral, en el Ecuador, se encuentra una alta concentración del área cultivada: para el año 2003, de las 153000 hectáreas de banano inscritas oficialmente, el 92% se concentra en las tres provincias [27]:

- El Oro (30%).
- Los Ríos (32%).
- Guayas (29.5%).
- Las provincias de El Cañar, Cotopaxi y Esmeraldas poseen juntas un 8% de todas las hectáreas inscritas.

Existen estudios realizados en 19 países productores de banano que permitieron conocer que las dosis de fertilizantes recomendadas alcanzarían a 211 kg N/ha/año, 35 kg P/ha/año y 323 kg P/ha/año. Para permitir máximos rendimientos, se recomienda duplicar las dosis [28]. La demanda de potasio va asociada a variaciones de sitio que dan lugar a recomendaciones variables y específicas. Por ejemplo se recomienda un mínimo de 500 kg/ha de K₂O, o bien como los resultados de los trabajos realizados en Costa Rica donde la mejor respuesta económica se consigue con dosis que varían entre 600 y 675 kg de K₂O/ha/año [28].

Para el caso del Nitrógeno en la producción bananera alrededor del mundo se utilizan dosis entre 100 a 600 kg N/ha/año dependiendo de las condiciones del suelo y las condiciones climáticas de la zona.

De las tres provincias El Oro, Guayas, Los Ríos, la que dispone de cultivos de banano de manera más uniforme es El Oro.



Figura 2. 2Extracto del Mapa Político del Ecuador. Provincia de El Oro (aporta con el 30% del cultivo total del Ecuador)[25].

En la Figura 2.2 se halla representada la provincia de El Oro que limita con las provincias del Guayas, Loja y Azuay. Su cultivo de mayor importancia es el banano, café y cacao, es atravesado por el río Jubones que nace en la Sierra del país y tiene su desembocadura en el océano Pacífico. Tiene un área de 5818 km², una población de 588546 habitantes, la precipitación pluvial media es de 200 a 1500 mm anuales [29][30].

Así mismo la zona bananera de esta provincia se halla inmersa en medio de dos poblaciones importantes como son la ciudad de Machala (capital de la provincia) y la ciudad de Pasaje.



Figura 2. 3Área de cultivo (Cn) de banano en la Provincia de El Oro.

La Figura 2.3 muestra parte de la provincia de El Oro en la cual se puede apreciar líneas rojas codificadas como “Cn”, el área correspondiente al cultivo de banano. En azul se halla representado el río Jubones que atraviesa esa zona. No hay otro río de mayor importancia en esa zona, lo que demuestra que recogerá todos los afluentes del sector bananero llevándolos al mar.

Para la verificación de los niveles de contaminación del suelo y las aguas a causa de aplicación y fertilizantes y nutrientes en los campos agrícolas se utilizará la “Ley de Gestión Ambiental Ley No. 37.RO/245 de 30 de Julio de 1999” [31] del Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador. En el Anexo 2 denominado “Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados” en el ítem 4.1.3.3 se presenta una tabla que indica en general los niveles de contaminación del suelo.

Factor de contaminación (Concentración presente/ valor de fondo)	Grado de perturbación	Denominación
< 1,5	0	Cero o perturbación insignificante
1,5 – 3,0	1	Perturbación evidente
3,0 – 10,0	2	Perturbación severa
> 10,0	3	Perturbación muy severa

Tabla 2. 1Factores indicativos de contaminación[31].

La Tabla 2.1 muestra que para determinar la concentración presente del parámetro bajo estudio en el área afectada, se procede a comparar los resultados obtenidos de la concentración presente en el suelo contra los valores de fondo. Se considera en general que una concentración presente mayor tres veces que el valor de fondo para el suelo denota contaminación que requiere atención inmediata por parte de la Entidad Ambiental de Control. Los valores de fondo de mayor confiabilidad serán aquellos derivados de muestras a tomarse en aquellas partes inmediatas fuera del área de estudio. Para determinar el valor de fondo o de referencia, se deben tomar al menos 5 a 20 muestras, el valor promedio debe ser seleccionado como valor de fondo [32].

El análisis de las muestras se lo puede realizar directamente en el sitio mediante la recolección de las mismas, la aplicación de reactivos y la aplicación de protocolos de medición propios para cada sustancia a ser determinada. Otro método consiste en llevar las muestras al laboratorio, aplicar los reactivos que fueren necesarios y los procedimientos de medida. Estos procedimientos requieren reactivos y conllevan el peligro de contaminar las muestras en el transporte.

Otro método de medición en el sitio es mediante sondas que no requieren reactivos, suelen permitir la realización de múltiples mediciones mientras no se deteriore la sonda de medición.

Sin importar el método de medida de las sustancias posiblemente contaminantes en el suelo o el agua, éstas no pueden sobrepasar los valores máximos permitidos por los organismos de control del medio ambiente.

NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA					
CRITERIO DE CALIDAD DE AGUAS					
CONSUMO	TRATAMIENTO	PARAMETRO	EXPRESADO COMO	UNIDAD	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Humano	Convencional	Nitrato	N-Nitrato	mg/l	10
Humano	Convencional	Nitrito	N-Nitrito	mg/l	1
Humano	Convencional	Pesticidas y Herbicidas	Carbamatos totales	mg/l	0,1
Humano	Convencional	Organofosforados totales	Organofosforados totales	mg/l	0,1
Humano	Desinfección	Nitrato	Nitrato	mg/l	10
Humano	Desinfección	Nitrito	Nitrito	mg/l	1
Humano	Desinfección	Organofosforados y Carbamatos		mg/l	0,1
Aguas Subterráneas		Carbamatos		ug/l	0,06
Aguas uso agrícola		Organofosforados totales		mg/l	0,1
Alcantarillado		Organofosforados y Carbamatos		mg/l	0,1
Alcantarillado		Nitrógeno		mg/l	40

Tabla 2. 2Criterios de calidad de las aguas [31].

En la Tabla 2.2 se muestran los valores máximos permisibles de concentración de nitratos, nitritos, organofosforados y carbamatos que se anotan en la *Ley de Gestión Ambiental Ley No. 37.RO/245 de 30 de Julio de 1999* [31].

Los datos definidos en esta norma servirán como referencia de medida para los valores encontrados con el sistema inalámbrico de monitoreo de pesticidas en cada estación de medida a lo largo del río Jubones.

2.3 Sensores Inalámbricos

Frecuencias de trabajo de los sensores inalámbricos

Las frecuencias de trabajo de los sensores se escogerán de acuerdo a lo permitido en el Plan Nacional de Frecuencias [34] que en su Capítulo III trata acerca de “Notas al Cuadro Nacional de atribución de Bandas de Frecuencias”. El Item 5.150 trata acerca de las bandas de frecuencias y se describe a continuación:

5.150 Las bandas:

13553 – 13 567 KHz (frecuencia central 13560 KHz), 26957 – 27283 KHz (frecuencia central 27120 KHz), 40.66 – 40.70 MHz (frecuencia central 40.68 MHz), 902 - 928 MHz en la Región 2 (frecuencia central 915 MHz), 2400 – 2500 MHz (frecuencia central 2450 MHz), 5725 – 5875 MHz (frecuencia central 5800 MHz) y 24 – 24.25 GHz (frecuencia central 24.125 GHz); están designadas para aplicaciones industriales,

científicas y médicas (ICM). Los servicios de radiocomunicación que funcionan en estas bandas deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones. Los equipos ICM que funcionen en estas bandas estarán sujetos a las disposiciones del número 15.13 [34].

Se utilizarán entonces los sensores inalámbricos de marca Crossbow debido a su gran versatilidad y rápido despliegue. El sistema inalámbrico se compone de una estación base MIB 520CB que permite la conectividad con la familia de Motas MICA y la programación del sistema. Posee un procesador Atmega 16L para la programación de las Motas. El código es descargado a través del puerto USB mediante la aplicación MoteConfig de Crossbow.

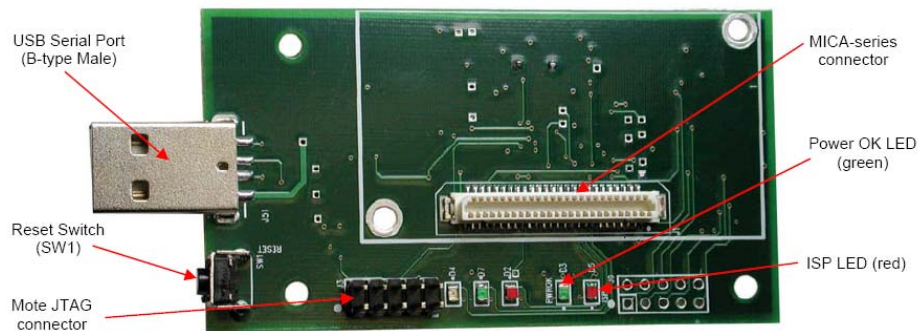


Figura 2. 4 Tarjeta de Interface USB MIB520CB [33].

La Figura 2.4 muestra la tarjeta USB MIB 520CM que interconecta la PC de control con el sistema inalámbrico al resto del sistema Crossbow.

Las Motas están compuestas por el producto MICAZ-MPR2400 operando en la banda de frecuencia de 2400 MHz a 2483.5 MHz. Utiliza un transceptor con el microprocesador Atmega128L, Chipcon CC2420, el estándar IEEE 802.15.4 ZigBee.



Figura 2. 5 Tarjeta MPR2400-MICAZ [33].

La Figura 2.5 muestra la tarjeta de radio MPR2400-MICAZ que conectada al MIB520CB, conforman el sistema de interconexión de la PC al medio inalámbrico.

Processor/Radio Board	MPR2400CA	Remarks
Processor Performance		
Program Flash Memory	128K bytes	
Measurement (Serial) Flash	512K bytes	> 100,000 Measurements
Configuration EEPROM	4K bytes	
Serial Communications	UART	0-3V transmission levels
Analog to Digital Converter	10 bit ADC	8 channel, 0-3V input
Other Interfaces	Digital I/O,I2C,SPI	
Current Draw	8 mA	Active mode
	< 15 μ A	Sleep mode
RF Transceiver		
Frequency band ¹	2400 MHz to 2483.5 MHz	ISM band, programmable in 1 MHz steps
Transmit (TX) data rate	250 kbps	
RF power	-24 dBm to 0 dBm	
Receive Sensitivity	-90 dBm (min), -94 dBm (typ)	
Adjacent channel rejection	47 dB	+ 5 MHz channel spacing
	38 dB	- 5 MHz channel spacing
Outdoor Range	75 m to 100 m	1/2 wave dipole antenna, LOS
Indoor Range	20 m to 30 m	1/2 wave dipole antenna
Current Draw	19.7 mA	Receive mode
	11 mA	TX, -10 dBm
	14 mA	TX, -5 dBm
	17.4 mA	TX, 0 dBm
	20 μ A	Idle mode, voltage regular on
	1 μ A	Sleep mode, voltage regulator off
Electromechanical		
Battery	2X AA batteries	Attached pack
External Power	2.7 V - 3.3 V	Molex connector provided
User Interface	3 LEDs	Red, green and yellow
Size (in)	2.25 x 1.25 x 0.25	Excluding battery pack
(mm)	58 x 32 x 7	Excluding battery pack
Weight (oz)	0.7	Excluding batteries
(grams)	18	Excluding batteries
Expansion Connector	51-pin	All major I/O signals

Tabla 2. 3Resumen de los productos MICA[33].

En la Tabla 2.3 se halla un resumen de características técnicas de los productos MICA, entre las cuales están primeramente el rango de las frecuencias de trabajo ISM desde 2.4 GHz hasta 2.4835 GHz, la potencia de trabajo está entre - 24 dBm a 0 dBm, una sensibilidad típica de -94 dBm.

Es necesario además utilizar la tarjeta de adquisición de datos multifuncional MDA300CA con sensores de temperatura y humedad.

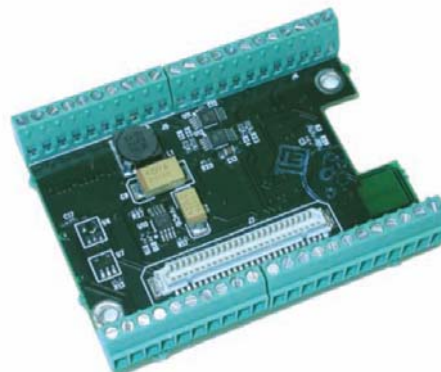


Figura 2. 6 Tarjeta de adquisición de datos MDA300CA [33].

La tarjeta descrita en la Figura 2.6 es compatible con los productos MICAZ y MICA2 de Crossbow. Dispone de 7 canales analógicos ADC de 12 bits con un rango de 0-2.5V, 0.6mV de precisión, 3 canales ADC de 12 bits diferencial con un rango de 0-2.5V, 0.6 mV de precisión, 4 canales ADC de 12 bits diferencial con alta ganancia, rango de +/- 12.5mV, 6 uV de precisión, 6 entradas digitales de interrupción, 6 salidas digitales, un relé normalmente cerrado, un relé normalmente abierto, un canal de un contador de alta velocidad, estado de adormecimiento de bajo consumo, un sensor a bordo de temperatura y humedad, software de control para TinyOS.

Es necesario utilizar también la tarjeta MTS400CA que dispone de cinco sensores ambientales que pueden ser utilizados en redes de monitoreo ambiental. Mediante un simple chip SHT11 se puede medir humedad y temperatura. Las especificaciones de dichas medidas se muestran en la siguiente Tabla 2.4.



Figura 2. 7 Tarjeta de adquisición de datos ambientales MTS400CA [33].

La tarjeta de la Figura 2.7 utiliza sensores de montaje superficial que optimizan el consumo energético extendiendo la vida útil de la batería del dispositivo sensor. Se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones de medición de variables medioambientales en el que se requiere bajos niveles de mantenimiento, además en agricultura, forestación y más. Posee acelerómetros en los dos ejes, sensor de presión barométrica, sensor de luz ambiental, sensor de humedad y temperatura relativa.

En la Tabla 2.4 aparecen algunas especificaciones importantes de la tarjeta de adquisición de datos MTS400CA que se utilizará para recolectar información de temperatura, humedad relativa, localización y luz solar.

DUAL - AXIS ACCELEROMETER	RELATIVE HUMUDITY & TEMPERATURE SENSOR
<ul style="list-style-type: none"> * Analog Devices ADXL202JE * Acceleration range: resolution: +/- 2g; 2 mg at 60 Hz * Nonlinearity: 0,2% of full scale * Zero g bias level: 2.0 mg/deg from 25 deg 	<ul style="list-style-type: none"> * Sensirion SHT11 * Humudity range; resolution: 0 - 100% RH; 0,03% RH * Absolute RH accuracy: +/- 3,5% RH * Temp. Range; resolution: - 40 deg to 123,8 deg; 0.01 deg * Temp. Accuracy: +/- 0,5deg @ 25deg
BAROMETRIC PRESSURE SENSOR	GPS MODULE (MTS420CA Only)
<ul style="list-style-type: none"> * Intersema MS5534AM * Pressure range, resolution: 300 - 1100 mbar; 0.1 mbar * Accuracy: +/- 1,5% at 25 deg * Operating temp. Range: -10deg to +60 deg 	<ul style="list-style-type: none"> * Leadtek GPS – 9546 * SiRFstar IIe/LP chipset * Tracking channels: 12 * L1 frequency: 1575,42 MHz * Position accuracy: 10 m, 2D * Reacquisition time: 0,1 sec. (typ); (< 30 sec. Max. Blocage)
AMBIENT LIGHT SENSOR	
<ul style="list-style-type: none"> * TAOS TSL255OD * Spectral responsivity: 100 - 1000 nm, similar to human eye 	

Tabla 2. 4Especificaciones técnicas de MTS400CA [33].

Estos componentes de Crossbow se conectan de tal manera que forman las Motas y el Gateway para la recopilación de datos en un punto específico tal como se indica en la siguiente Figura 2.8.

La Mota se halla compuesta por las tarjetas de radio MPR2400CA, la tarjeta de adquisición de datos MDA300CA, otra tarjeta de sensores de humedad relativa y temperatura MTS400CA.

El Gateway o Pasarela está compuesto por la tarjeta de radio MPR2400CA, la tarjeta de interface a la PC MIB520CB, y por último una PC con interface USB. Esta a su vez deberá conectarse vía radio con otros Gateway remotos.

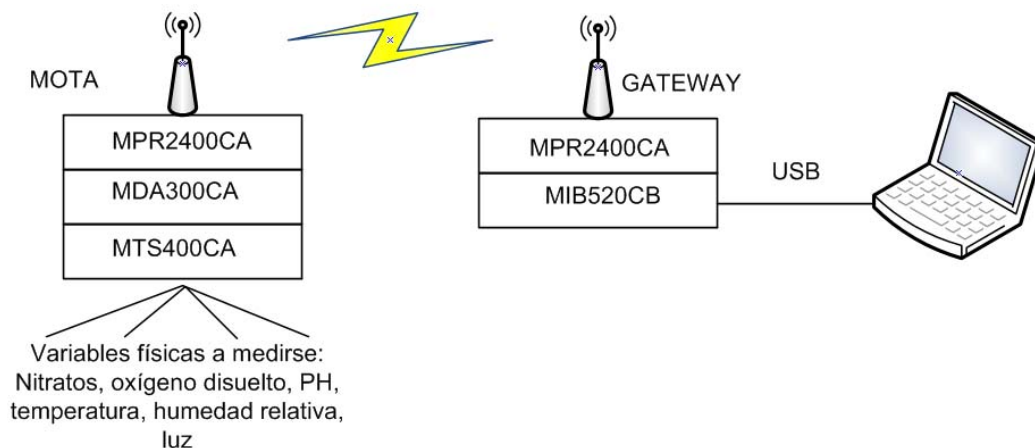


Figura 2. 8 Esquema de conexión de las tarjetas Crossbow.

La Figura 2.8 muestra los componentes Crossbow formando el sistema de sensores inalámbricos operando en la banda de 2.4 GHz. Se conectan inalámbricamente a la PC la cual enviará la información luego al ruteador para el radioenlace con otras estaciones de medida del sistema de monitoreo.

2.4 Sondas de Nitratos

Considerando que el nitrato es uno de los componentes más frecuentes de aguas subterráneas en zonas rurales, y que su presencia en niveles excesivos (superiores a 10 mg/l) pueden provocar enfermedades, además de que su presencia indica la posible evidencia de otros contaminantes más peligrosos en aguas de ríos y de consumo humano, es muy conveniente utilizar sondas de *nitratos* para aguas de ríos, subterráneas o en general de zonas de almacenamiento de agua.

Se requieren sondas de nitratos cuyo rango de medida supere el valor máximo permisible de los 10 mg/l, que no utilice reactivos, que permita realizar las mediciones en línea con señales de salida analógicas / digitales, consumo mínimo de energía y de alta durabilidad y confiabilidad, con ciclos de mantenimiento automáticos y ajustables.

Existen en el mercado algunas marcas de sondas que pueden cumplir con estos requisitos. La presente investigación ha llevado a encontrarse con los productos de WTW (Wissenschaftlich-Technische-Werkstätten) [35] que se utilizarán en el presente trabajo debido a su alta confiabilidad demostrada en trabajos de investigación de tratamiento de aguas en el Centro de Investigaciones Científicas de la Escuela Politécnica del Ejército de Quito Ecuador [36].

En la Figura 2.9 se presenta un esquema con los productos WTW a utilizarse como sensores de Nitratos.

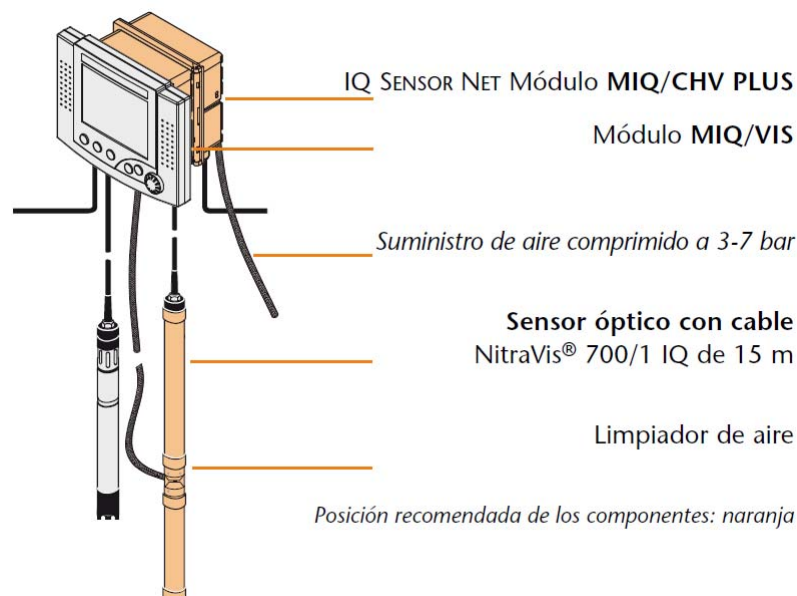


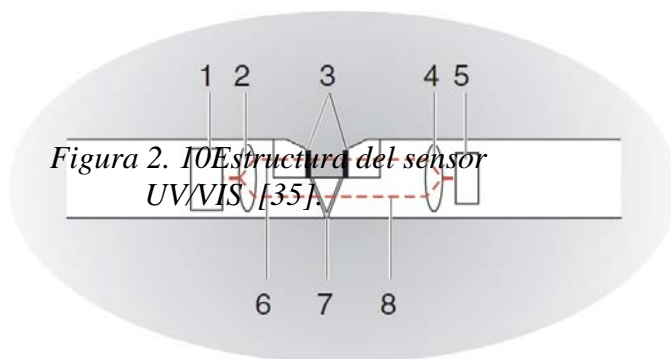
Figura 2. 9Módulo Sensor de Nitratos in-situ de WTW.

La Figura 2.9 muestra componentes WTW con módulos de fuente de poder, tratamiento de señales y comunicaciones IQ Sensor Net MIQ/CHV Plus. Dispone de un sensor óptico con cable NitraVis 700/1 IQ de 15 m. Este sensor requiere de dispositivos de limpieza mediante aire.

Sensor Óptico con cable NitraVis 700/1 IQ de 15m

Es un instrumento de medición espectral de alta precisión que permite determinar el valor real de nitrato. Las interferencias provocadas por el nitrito y los sólidos suspendidos pueden ser detectadas fácilmente gracias a la información espectral disponible [35].

La estructura del sensor UV/VIS se muestra en la Figura 2.10. El sensor contiene una fuente de luz (1), un espacio de medida (3) para permitir el contacto de la luz con la solución de medición, y un detector (5) para medir el rayo de luz atenuada. El remitente del sistema óptico (2) dirige un rayo de luz, la medición del haz (6), a través de la solución de medición y un haz de luz en segundo lugar, el haz de referencia (8) a una distancia de medición sin solución. La muestra de ensayo se encuentra entre las dos ventanas de medición (3) en la brecha de medición.



- 1.- Fuente de Luz.
- 2.- Remitente del sistema Óptico.
- 3.- Brecha de medición entre la ventana de medida.
- 4.- Receptor del sistema Óptico.
- 5.- Detector.
- 6.- Medición del haz.
- 7.- Inyectores de limpieza para el sistema de limpieza de aire comprimido.
- 8.- Haz de referencia.

En la Tabla 2.5 se hallan las especificaciones técnicas del sistema NitraVis que utiliza el principio de medidas espectrales para detectar Nitratos.

Technical Data NitraVis® System			
Measuring Principle	Spectral Measurement in the UV/VIS Range (200 - 750 nm)		
Applications	Municipal wastewater: inlet, aeration, outlet		
Measuring Range Nitrate Standard	NO ₃ -N:	NitraVis® 700/1 0.1 ... 100,0 mg/l inlet, aeration	NitraVis® 700/5 0.01 ... 25,00 mg/l outlet
Accuracy	±3% of measured value ±0.5 mg/l (with Check algorithm, in standard solution)		
Measuring Range Suspended Solids (Option)	TSS: municipal wastewater:	0 ... 10.00 g/l inlet, aeration	0 ... 900.0 mg/l outlet
Materials	Housing: Al Mg Si 1, anodized Window: Sapphire glass		
Pressure Resistance	≤1 bar		
Ambient Conditions	Housing: Al Mg Si 1, anodized Window: Sapphire glass		
Flow velocity	≤3 m/s		
pH range	pH 4 ... pH 9		
Salt content of medium	< 5000 mg/l (Chloride)		
Dimensions	25.59 x 1.73 in. (650 x 44 mm; length x max. diameter)		
Weight	Approx. 2.43 lb (1.1 kg)		
Guaranty	2 years for defects of quality		

Tabla 2. 5Especificaciones técnicas del sistema NitraVis [35].

La Tabla 2.5 muestra las especificaciones técnicas del sistema NitraVis 700/l cuyo rango de medida de Nitratos va de 0,1 hasta 100 mg/litro.

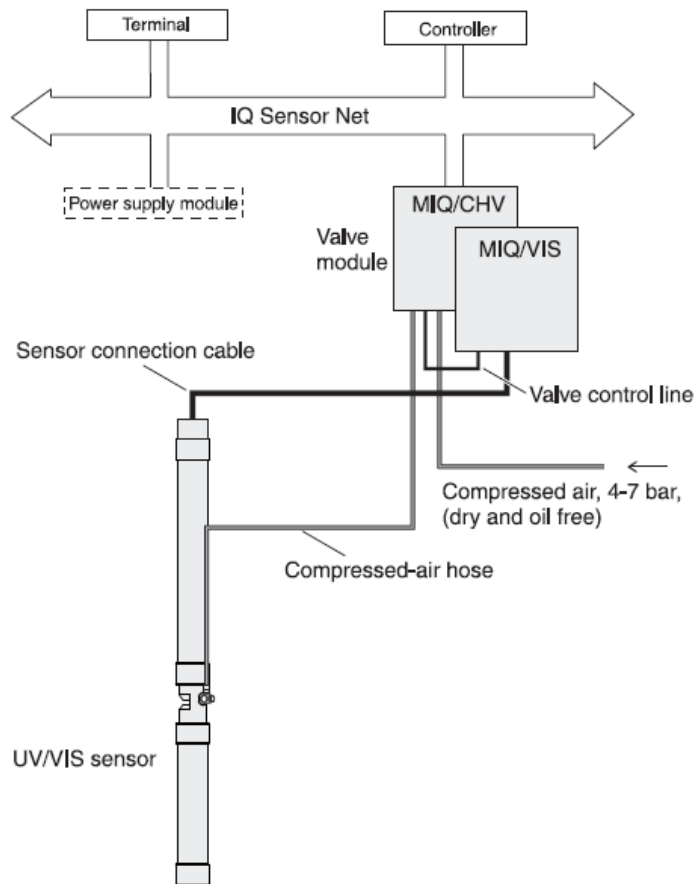


Figura 2. 11Sistema de limpieza NitraVis 700/xIQ TS en el IQ Sensor Net [35].

La Figura 2.11 muestra la integración del sistema de limpieza NitraVis 700/ x IQ TS en el IQ SENSOR NET. Los sensores y módulos de control deben ser del mismo fabricante a fin de obtener buen funcionamiento.

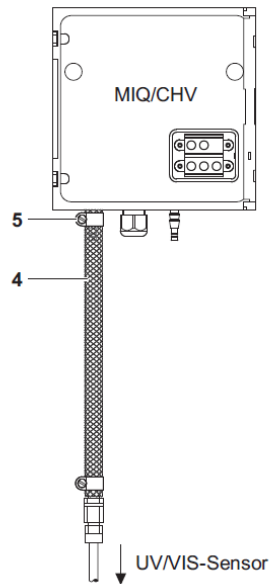


Figura 2. 12 Conexión del aire comprimido al módulo MIQ/CHV.

La conexión del aire comprimido para la limpieza de la sonda NitraVis se lo hace a través del módulo MIQ/CHV, tal como se indica en la Figura 2.12. Debe tener cuidado con este módulo y sus conexiones ya que se maneja aire comprimido y la manguera de aire debe estar libre de presión para realizar su trabajo sin riesgo alguno.

La conexión del Sensor UV/VIS NitraVis 700/x IQ TS se puede conectar a la red IQ Sensor Net a través del módulo MIQ/VIS tal como se indica en la Figura 2.13.

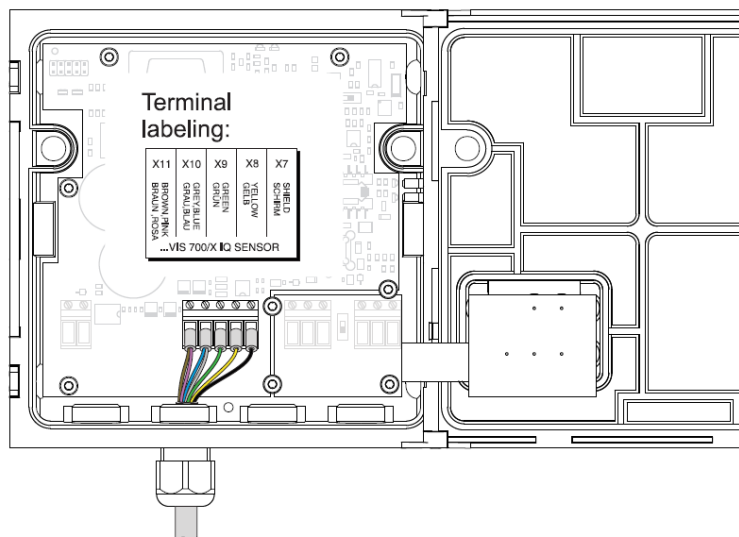


Figura 2. 13 Conexión del Sensor UV/VIS en el módulo MIQ/VIS.

La Figura 2.13 muestra la denominación de los terminales de conexión de la sonda Nitra Vis 700/X IQ Sensor hacia el exterior.

Con la función de control de aire comprimido en el tiempo para la limpieza, el control de la válvula en el módulo MIQ/CHV se controla mediante el módulo MIQ/VIS. Los módulos se conectarán a través de una línea de control de dos hilos.

2.5 Sondas de pH

Se utilizará la sonda WTW Sensolyt 700 IQ ECA / EC que corresponde a una sonda de pH equipada con diafragma perforado sencillo y un electrolito gelificado. Se trata de una sonda ideal para aguas residuales urbanas y de río.



Figura 2. 14 Sonda y armadura WTW para medición in situ de pH [25].

La Figura 2.14 muestra la sonda Sensolyt 700 IQ ECA /EC que tiene la particularidad de tener un electrolito de gel para brindarle durabilidad.

Respecto de los rangos de medida y otras características de construcción, se encuentran en la Tabla 2.6.

Como se puede observar en la Tabla 2.6, la sonda Sensolyt ECA/EC tiene un rango de medición de pH de 2 a 14, lo que permitirá realizar medidas en un amplio rango.

Datos técnicos – Ensambles SensoLyt®				
SensoLyt®	700 (SW*)	690	650	700 IQ (SW*)
Preamplificador integrado	Sí		No	Sí
Salida de señal	Baja impedancia, analógica		Alta impedancia, analógica	Digital
Función Sens-Check	Sí	No	No	Sí
Memoria en la sonda para guardar datos de calibración	-			Sí
Consumo de energía	-			0,2 watio
Medición de temperatura	NTC integrado, 0 °C ... +60 °C			NTC integrado, -5 °C ... +60 °C
Condiciones ambientales	Temperatura de funcionamiento: 0 °C ... +60 °C			Temperatura de funcionamiento: 0 °C ... +60 °C
Conexión eléctrica	Cable PU integrado de conexión con enchufe de 7 polos de rosca (IP 65)		Cable PU de conexión con extremos de cable abiertos	Cable blindado de 2 conductores con cierre rápido en la sonda
Protección integrada contra rayos	Sí			Sí
Compatibilidad electromagnética	EN 61326 Clase B, FCC Clase A			EN 61326 Clase B, FCC Clase A Alta inmunidad a interferencias (para equipos de uso indispensable)
Certificaciones	CUL, UL			CE, cETLus
Componentes mecánicos	Carcasa: POM Cestillo de protección: PVC Clase de protección: IP 68			Carcasa: acero fino V4A 1.4571 Cestillo de protección: PVC Asiento de la cadena de medición: POM Clase de protección: IP 68
Dimensiones (Largo por Diámetro)	311 x 40 mm; versión SW: 318 x 59,5 mm			508 x 40 mm; versión SW: 515 x 59,5 mm
Peso (sin cable)	Aprox. 320 g; versión SW: aprox. 880 g			Aprox. 970 g; versión SW: aprox. 1.800 g

* SW: sonda en versión para agua marina (con armadura de plástico, polioximetileno)

Datos técnicos – Electrodo de combinación SensoLyt®					
	SEA / SE*	SEA-HP	DWA / DW*	ECA / EC*	PLA / PL*
Tipo de electrodos	Diafragma perforado doble de electrolito sólido de gel-polímero		Diafragma de cerámica modificado de electrolito de gel	Diafragma de una perforación con electrolito de gel	Diafragma perforado doble de electrolito sólido de gel-polímero
Condiciones operativas (Presión/Temperatura)	10 bar / 20°C 1 bar / 60°C 0 ... 60 °C	10 bar / 60°C 0 ... 60 °C	6 bar / 20°C 1 bar / 60°C 0 ... 60 °C	6 bar / 20°C 1 bar / 60°C 0 ... 60 °C	10 bar / 20°C 1 bar / 60°C 0 ... 60 °C
Intervalo de medición	2 ... 12 pH		0 ... 14 pH	2 ... 12 pH	±2000 mV**
Componentes mecánicos	Membrana de vidrio cilíndrica, versiones blindadas con armadura de protección de PVC (SEA-HP: POM), 2 juntas corredizas de aros tóricos para su montaje en las armaduras SensoLyt®				
Dimensiones	Longitud 120 mm (sin cabezal enchufable)				
Conexión eléctrica	Cabezal enchufable impermeable para electrodos				

* Electrodo sin armadura, por ejemplo para el montaje en recipientes de paso ** dependiendo del monitor

Tabla 2. 6 Datos técnicos de sonda de pH [35].

2.6 Sondas de Oxígeno disuelto

Se utilizará la sonda TriOxmatic 701 IQ la cual cuenta con buena resolución y tiempos de reacción cortos según se indica en la Figura 2.16.

Se trata de una sonda digital que cuenta con memoria de valores de calibración para la conexión a la IQ Sensor Net.

Como se puede observar en la Figura 2.15, el intervalo de medición puede ser de 0 a 20 mg/l o de 0 a 60 mg/l. La resolución va de 0.01 mg/l a 0.1 mg/l y el tiempo de respuesta tiene un valor mínimo de 30 segundos.

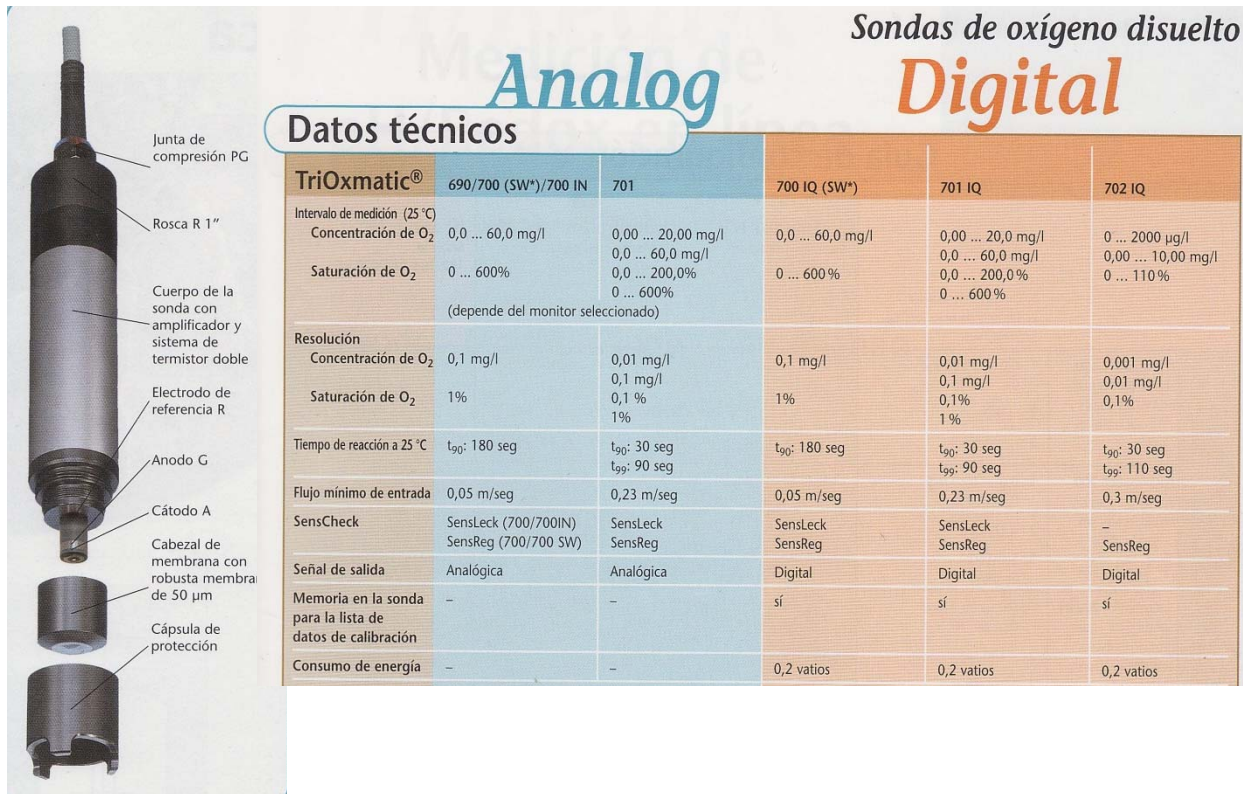


Figura 2. 15 Sonda WTW de Oxígeno Disuelto TriOxmatic 701 IQ [35].

2.7 Alimentación de sensores, sondas y controlador de datos

La alimentación eléctrica de los sensores inalámbricos se lo realiza mediante baterías, por ejemplo LiMH AA. Esto permite autonomía en el funcionamiento especialmente cuando los sensores se hallan distantes unos de otros desde centímetros a decenas de metros.

Ya que generalmente los sensores inalámbricos tan sólo son parte de sistemas de monitoreo, el sistema de alimentación debe capaz de proveer energía eléctrica al resto de componentes electrónicos. Se requiere por lo tanto conocer el consumo eléctrico de cada subsistema y el tiempo aproximado de autonomía eléctrica en caso de fallas del sistema principal de funcionamiento.

El consumo eléctrico de los componentes Crossbow se indica en la siguiente Tabla 2.7.

ITEM	COMPONENTE	Corriente de consumo	Potencia consumida (W)
1	MPR2400	25 mA en modo despierto y 15 uA en modo de adormecimiento	0,075 W
2	MDA300CA	Corriente baja de salida 50 mA	0,150 W
3	MTS400CA	60 mA	0,198 W

Tabla 2. 7Consumo eléctrico de los equipos Crossbow.

La Tabla 2.7 muestra el consumo eléctrico de los equipos Crossbow, que es realmente muy bajo para cada WSN. La mayor parte de energía utilizada por el WSN está en el sistema de radiofrecuencia cuando se despierta y realiza transmisiones.

El consumo eléctrico de los componentes WTW utilizados en esta aplicación para medida de nitratos, pH y Oxígeno Disuelto en el agua es como se indica en la siguiente figura.

ITEM	COMPONENTE	Potencia consumida o suministrada (W)	
1	Módulo IQ/24 V para alimentación eléctrica con 24 VAC ó 24 VCC de tensión de entrada	+ 18	Para el sistema compuesto por un sensor de Nitratos, uno de pH y otro de Oxígeno Disuelto, es necesario utilizar una sola fuente de alimentación MIQ/24V. El consumo total sería de 10,9 W y sobrarían 7,1 W para otros consumos.
2	Sonda espectrométrica de Luz Ultravioleta / Luz visible in situ NitraVis 700 IQ; Sonda Óptica de Nitrato	- 7	
3	Controlador / terminal MIQ/C184 XT	- 3	
4	Módulo MIQ/VIS para la conexión de una sonda UV/VIS NitraVis	-0,5	
6	Sonda Sensolyt 700 IQ	- 0,2	
7	sonda TriOxmatic 701 IQ	- 0,2	
	TOTAL SOBRANTE (W)	+ 7,1	

Tabla 2. 8Consumo eléctrico de los equipos WTW.

La Tabla 2.8 muestra que la potencia máxima de entrega de la fuente de alimentación es de 18 Watts. La potencia utilizada por los componentes WTW es de 10.9 W, esto significa que habrán 7.1 W todavía que no se han utilizado. Estos valores de consumo eléctrico son muy importantes para el momento de diseñar el sistema de respaldo de energía fotovoltaica.

Considerando que la red de sensores inalámbricos se hallará a lo largo del río Jubones *estrictamente antes, dentro y después de la zona bananera*, el problema de alimentación eléctrica del sistema de monitoreo puede verse o no resuelto ya que depende también de la cercanía de zonas pobladas.

2.8 Software de simulación de la red WSN mediante NS2 [38]

Es relativamente complejo modelar analíticamente una red de sensores inalámbricos. Se deben considerar algunas variables como el escenario de simulación, la capa física, la capa de acceso al medio, el número de sensores, el tipo de aplicación y otros factores. Básicamente la simulación es el estudio del comportamiento de estos factores dentro de una red inalámbrica WSN. Se requiere entonces saber el modelo matemático a seguir y la herramienta informática a utilizar. Se utilizan entonces modelos de propagación específicos, protocolos de comunicación, características de transmisión y recepción de los equipos fundamentalmente.

El software de simulación entonces permite un marco para modelar y reproducir las condiciones reales del sistema. Esta herramienta puede estar compuesta por interfaces gráficas que ayuden a manejar eficientemente los componentes de la red.

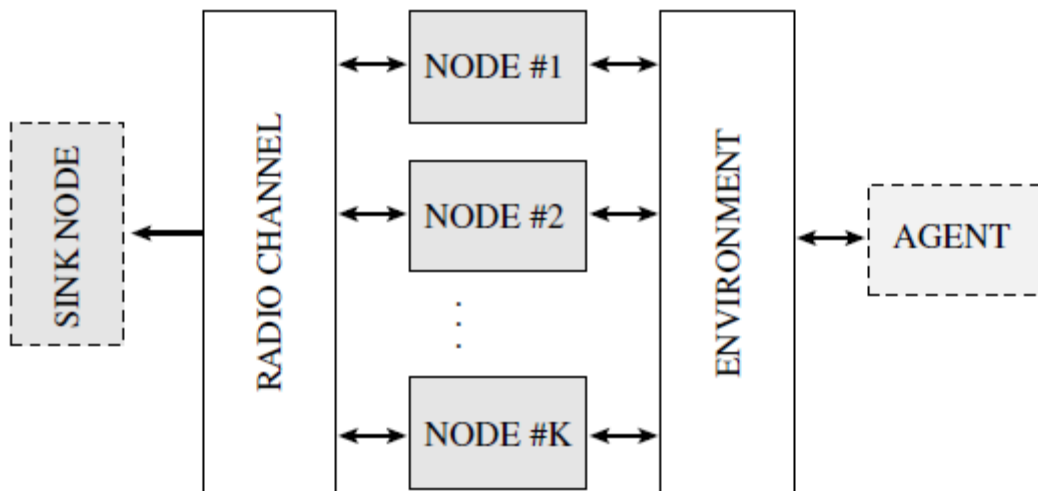


Figura 2. 16 Modelo de Wireless Sensor Network [37].

La Figura 2.16 muestra el modelo general seguido por el software de simulación de redes. Se definen los nodos involucrados en la simulación, el modelo del canal de propagación, el entorno de propagación y el agente utilizado.

El comportamiento de la red de sensores inalámbricos se lo puede realizar mediante algunas aplicaciones como por ejemplo NS2, OPNET y otros.

Network Simulator (NS2) es un simulador discreto de eventos creado por la Universidad de Berkeley para modelar redes de tipo IP. En la simulación se considera la estructura o topología de la red y el tráfico de paquetes que posee la misma, con el fin de diagnosticar el comportamiento de la red al modificar algunas características.

Se pueden realizar simulaciones de redes cableadas e inalámbricas.

En las *redes cableadas* se pueden utilizar protocolos de ruteo como DV (distance vector), LS (link state) y multicast. Los protocolos de transporte utilizados son TCP, UDP, RTP y SCTP. Las fuentes de tráfico pueden ser web, ftp, telnet, cbr y stochastic. Se pueden manejar colas tipo drop-tail, RED, FQ y DRR.

En las *redes inalámbricas* se utilizan protocolos de ruteo AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector) utilizado para redes móviles ad-hoc, DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) e IP móvil.

Esta herramienta posee utilidades que permiten visualizar los nodos y analizar las trazas entre otras tantas utilidades.

El simulador NS2 está escrito en C++ y su funcionamiento básico se muestra en la Figura 2.17.

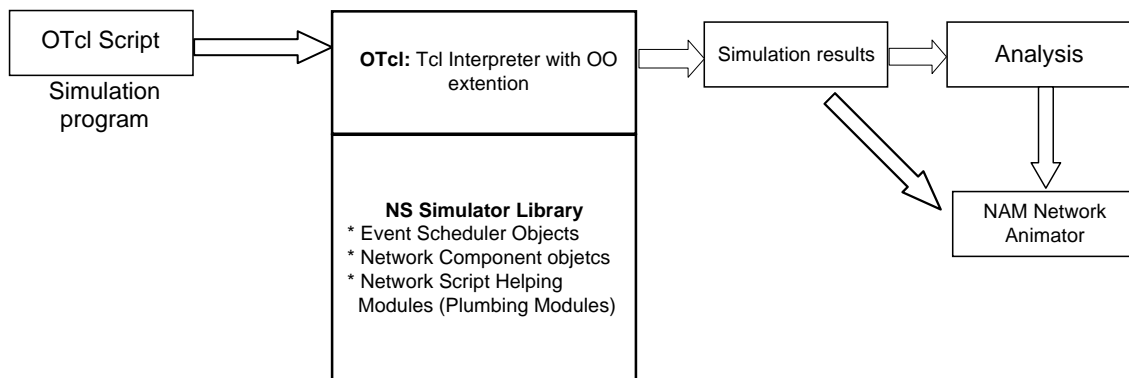


Figura 2. 17Funcionamiento del NS2 [38].

La Figura 2.17 muestra el sistema de simulación cuya entrada se lo hace a través de un script escrito en OTcl que utiliza algunas librerías para definir variables como la topología de la red, el canal de comunicaciones, los protocolos de comunicación, el tipo de tráfico, la calendarización de los eventos, tiempo de simulación, etc.

A continuación se describen brevemente los componentes del sistema NS2.

Script OTcl

Este componente permite describir el conjunto de tareas a realizarse durante toda la simulación. Entre las tareas programadas, se pueden describir las siguientes:

- Creación del programador de eventos.
- Activación de seguimientos.
- Creación de la red.
- Configuración del ruteo.
- Inserción de errores.
- Creación de conexiones de transporte.
- Creación de tráfico.
- Transmisión de datos a nivel de aplicación.

Intérprete OTcl y librerías

El simulador NS2 está orientado a objetos escrito en C++ con un intérprete OTcl. Soporta clases jerárquicas en C++ y en OTcl a fin de crear un objeto a través del intérprete. Por lo tanto, es necesario dos lenguajes de tipos diferentes para ejecutar distintas tareas del simulador. Por un lado se tienen protocolos que son manejados en el orden de los bytes y de paquetes, así como algoritmos que manejan grandes cantidades de datos. Por otro lado, se requieren manejos de parámetros de configuración para simular distintos escenarios de la red.

2.8.1 Simulación y resultados

Los resultados de la simulación se observan en un archivo con extensión *tr* que registra todos los eventos programados. El formato del archivo **.tr* se muestra en la Figura 2.18.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12



```

r : receive (at to_node)
+ : enqueue (at queue)          src_addr : node.port (3.0)
- : dequeue (at queue)         dst_addr : node.port (0.0)
d : drop      (at queue)

r 1.3556 3 2 ack 40 ----- 1 3.0 0.0 15 201
+ 1.3556 2 0 ack 40 ----- 1 3.0 0.0 15 201
- 1.3556 2 0 ack 40 ----- 1 3.0 0.0 15 201
r 1.35576 0 2 tcp 1000 ----- 1 0.0 3.0 29 199
+ 1.35576 2 3 tcp 1000 ----- 1 0.0 3.0 29 199
d 1.35576 2 3 tcp 1000 ----- 1 0.0 3.0 29 199
+ 1.356 1 2 cbr 1000 ----- 2 1.0 3.1 157 207
- 1.356 1 2 cbr 1000 ----- 2 1.0 3.1 157 207
    
```

Figura 2. 18 Estructura del archivo de salida **.tr*

La Figura 2.18 muestra la estructura **.tr* donde:

- 1.- events (eventos): representa uno de los cuatro posibles eventos; **r** (recibido), **+** (puesto en cola), **-** (sacarlo de la cola), y **d** (dropped o desechados). Para las redes inalámbricas los eventos son **r** (recibido), **s** (enviados), **f** (transmitido).
- 2.- Representa el tiempo en que ocurren los eventos.
- 3.- Es el nodo que al comienzo del enlace registra todo el evento.
- 4.- Es el nodo al extremo del enlace en el cual ocurre el evento.
- 5.- Representa el tipo de paquete, por ejemplo TCP, CBR, UDP, ACK, y otros paquetes más.
- 6.- Representa el tamaño del paquete.
- 7.- Representa algunas banderas de control.

- 8.- Es un identificador de flujo.
- 9.- Representa la dirección origen del nodo.
- 10.- Representa la dirección destino utilizada por el simulador.
- 11.- Es un indicador de secuencia de paquete de la capa de red. Este campo siempre está lleno ya que lo requiere el simulador.
- 12.- Es un identificador único de paquete.

2.8.2 Análisis gráfico de la salida NAM

Se realiza a través de una herramienta denominada Network Animator (NAM). Está basado en TCL/TK para visualizar las trazas de la simulación de una red y los paquetes de datos a partir de un archivo de trazas *.tr, este archivo contiene información como por ejemplo los nodos, topología y enlaces.

En la Figura 2.20 se observa la interface gráfica de esta herramienta NAM.

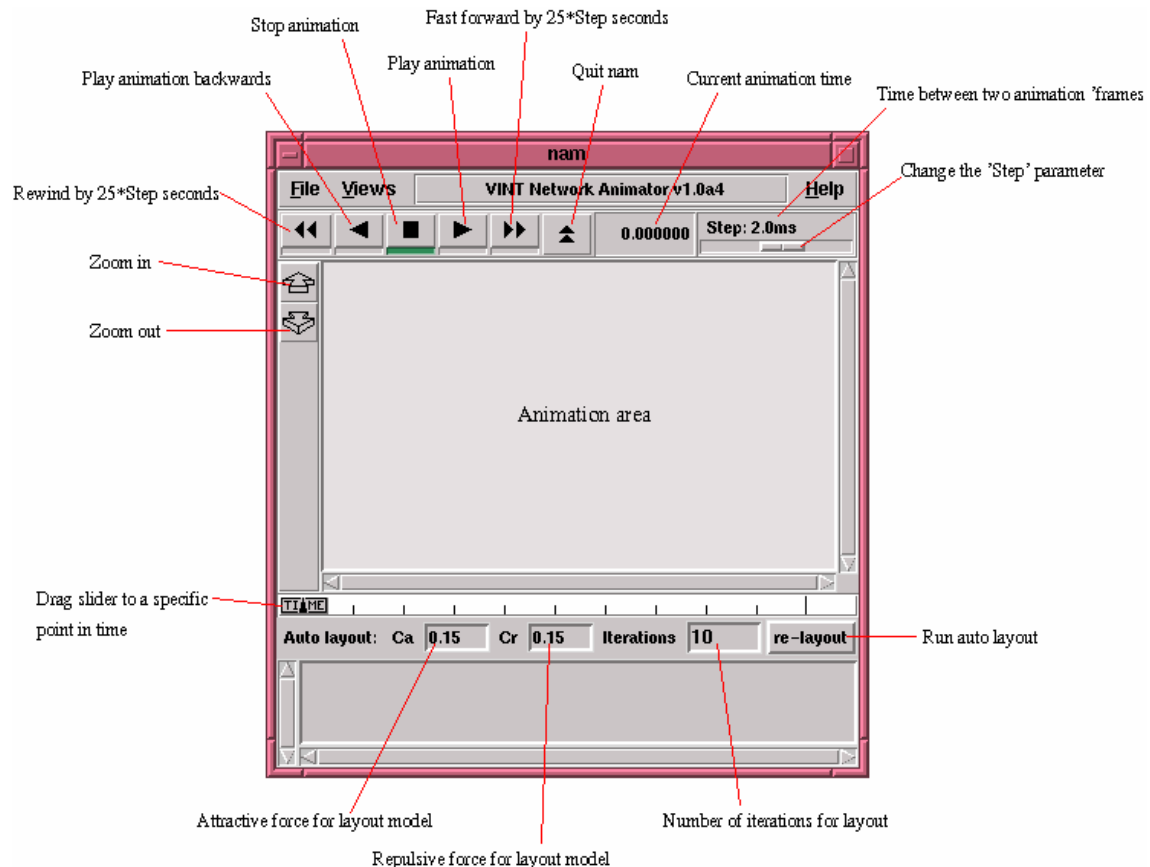


Figura 2. 19Interfaz gráfica de la herramienta NAM [39].

La Figura 2.19 muestra algunos componentes como:

- *Animation Area*: aquí se puede visualizar la topología de la red especificada en el simulador.

- *Zoom In /Zoom Out*: permite aumentar o disminuir el área de simulación.
- *Stop/Play Animation*: inicia la simulación o la detiene.
- *Current Animation Time*: muestra el tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación. El tiempo máximo se halla determinado al inicio de la simulación.
- *Step*: indica la velocidad con la que transcurre la simulación. Está marcado en milisegundos.
- *File*: permite grabar la simulación, imprimir el área de simulación, etc.

2.8.4 Herramienta Tracegraph

Es una aplicación muy útil para los usuarios de NS2, permite eliminar la necesidad para configurar y ejecutar otras aplicaciones complejas sobre los archivos de trazas simplificando su análisis [40].

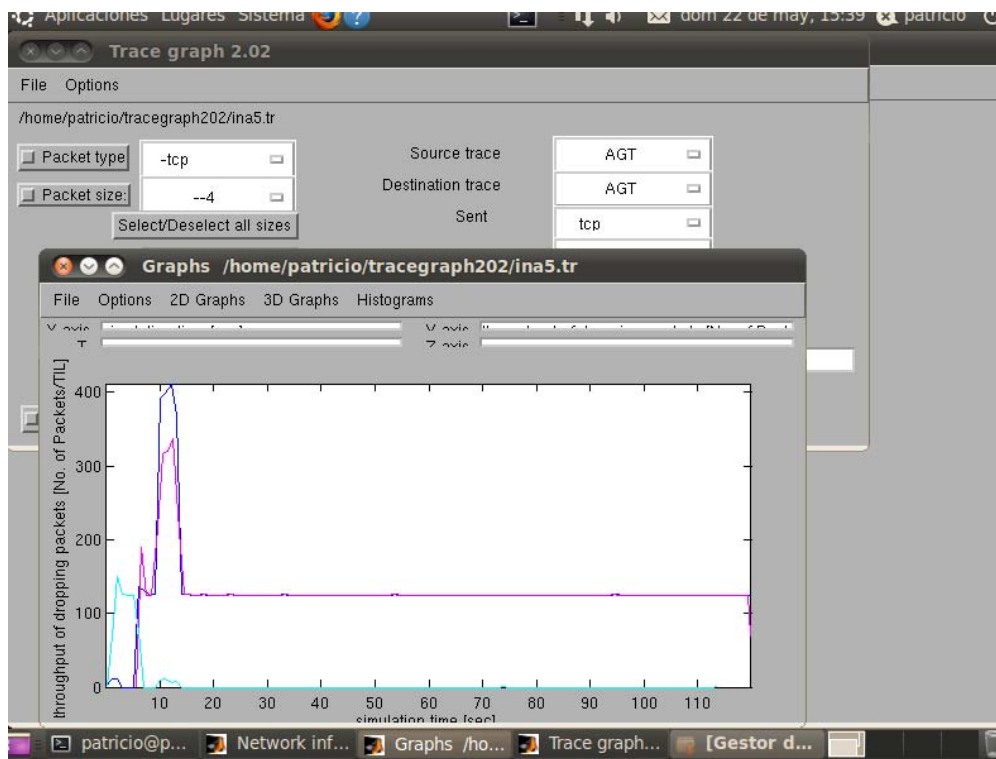


Figura 2. 20 Interfaz de Trace Graph 2.2

La Figura 2.20 muestra los resultados gráficos luego del análisis de un archivo de trazas *.tr. Entre los resultados más importantes están:

- La suma acumulada de paquetes transmitidos, la suma acumulada de paquetes recibidos y perdidos. El rendimiento (throughput) de nodos específicos.
- El Jitter, y retardo (Delay).

A través de estos datos se puede estimar la Calidad del Servicio (QoS) de la red de sensores inalámbricos para un entorno y topología determinados.

2.8.5 Modelos de Radiopropagación

Los modelos de propagación se utilizan para predecir la potencia de la señal recibida de cada paquete. En la capa física de cada nodo sensor, existe un nivel de recepción. Cuando se recibe un paquete, si la potencia de la señal recibida es más baja que este umbral, esta recepción se marca como un error debido a un paquete perdido en la capa MAC.

Hasta ahora existen tres modelos de propagación que se estudian a través del simulador NS, estos son: modelo del espacio libre, modelo de dos rayos reflejados en tierra, y modelo de sombra (shadowing).

Modelo del espacio libre

Este modelo de propagación asume que la condición ideal de propagación es a través de la línea de vista entre transmisor y receptor. H. T. Friis presentó la siguiente expresión para calcular la potencia de la señal recibida en el espacio libre a una distancia d desde el transmisor [38].

$$Pr(d) = \frac{Pt \cdot Gt \cdot Gr \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^2 \cdot L} \quad (2.1)$$

Donde:

Pt : potencia de la señal transmitida.

Gt, Gr : ganancias de las antenas transmisora y receptora respectivamente.

$L(L \geq 1)$: pérdida del sistema.

λ : es la longitud de onda

Este modelo representa el rango de comunicaciones como un círculo alrededor del transmisor. Es común en este modelo que $Gt = Gr = 1$ y $L = 1$ en el simulador NS.

Modelo de reflexión de los dos rayos

Este modelo de propagación considera que la comunicación entre transmisor y receptor se debe a dos rayos, el principal por línea de vista y el secundario producto de la reflexión en el suelo. Este modelo es más real ya que considera las reflexiones que deben tomarse en cuenta a mayores distancias [38].

La potencia de la señal recibida a la distancia d se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Pr}(d) = \frac{\text{Pt. Gr. ht}^2 \cdot \text{hr}^2}{d^4 \cdot L} \quad (2.2)$$

Donde:

ht, hr : alturas de las antenas de transmisión y recepción respectivamente.

En la ecuación 2.2 se nota que la potencia decrece más rápidamente con la distancia. Este modelo de propagación no es aconsejable para distancias cortas debido a la combinación del efecto constructivo y destructivo de los dos rayos. En la distancia de cruce, los dos modelos generan el mismo resultado, por lo tanto, la *distancia de cruce* se calcula de la siguiente manera:

$$dc = (4\pi \cdot ht \cdot hr) / \lambda \quad (2.3)$$

Esta última expresión 2.2 indica que se requieren conocer las dos alturas de las antenas y la longitud de onda de la señal transmitida.

Modelo Shadowing

Los dos modelos del espacio libre y de los dos rayos predicen la potencia de la señal recibida como una función determinística de la distancia. Estos modelos asumen el rango de comunicaciones como un círculo. Realmente la potencia de la señal recibida es una variable aleatoria debido a los efectos del multi-camino, lo cual se conoce como un efecto del desvanecimiento. Por lo tanto, existe otro modelo de propagación ampliamente utilizado denominado de sombra o shadowing.

Este modelo considera dos partes:

1.- La primera conocida como modelo de pérdida de trayectoria (*path loss model*), la cual también predice la *potencia media* de la señal recibida a la distancia d , anotada como $Prm(d)$. Utiliza una distancia de referencia do . La potencia $Prm(d)$ se calcula relativa a $Pr(do)$ de la siguiente manera

$$\frac{Pr(do)}{Prm(d)} = \left(\frac{d}{do}\right)^\beta \quad (2.4)$$

Donde:

β : exponente de la pérdida de trayectoria, es un valor empírico determinado por mediciones de campo. De la ecuación 2.1 se deduce que $\beta = 2$ para el modelo de propagación en el espacio libre. En la Tabla 2.9 se presentan algunos valores típicos de β . Los valores más grandes representan obstrucciones mayores y por lo tanto decrece más rápidamente la potencia de la señal recibida en cuanto la distancia crece.

La pérdida de trayectoria se calcula usualmente en dB de la siguiente manera:

$$\left[\frac{Prm(d)}{Pr(do)} \right]_{dB} = -10. \beta. \log \left(\frac{d}{do} \right) \quad (2.5)$$

Environment		β
Outdoor	Free space	2
	Shadowes urban area	2.7 to 5
In building	Line-of-sight	1.6 to 1.8
	Obstructed	4 to 6

Tabla 2. 9Valores típicos del exponente β .

2.- La segunda parte del modelo *shadowing* refleja la variación de la potencia de la señal recibida con la distancia. Es una función aleatoria log-normal, es decir, una función de distribución Gaussiana en dB. El modelo completo se representa de la siguiente manera:

$$\left[\frac{Prm(d)}{Pr(do)} \right]_{dB} = -10. \beta. \log \left(\frac{d}{do} \right) + X_{dB} \quad (2.6)$$

Donde X_{dB} es una variable aleatoria Gaussiana con una media de cero y una desviación estándar σ_{dB} denominada *desviación shadowing* y se obtiene también de mediciones experimentales. En la Tabla 2.10 se muestran algunos valores típicos de dicha desviación. La ecuación (2.6) también se conoce como *modelo log-normal shadowing*.

Environment	σ_{dB}
Outdoor	4 to 12
Office, hard partition	7
Office, soft partition	9.6
Factory, line-of-sight	3 to 6
Factory, obstructed	6.8

Tabla 2. 10Valores típicos de la desviación *shadowing*.

Los valores de la desviación *shadowing* mostrados en la Tabla 2.10 muestran diferentes entornos de propagación que se ajustan más a las condiciones reales. Sin embargo para distancias cortas de algunos metros estos dos últimos modelos de los dos rayos y *shadowing* podrían arrojar los mismos resultados en el simulador.

2.8.6 Protocolos de encaminamiento [41]

En las redes multisalto, los nodos intermedios tienen que enviar paquetes desde los nodos fuentes a nodos destino. De esta forma estos nodos intermedios deben decidir por cual nodo vecino enviar dichos paquetes. Típicamente, las tablas de ruteo mantienen las listas de los vecinos más apropiados para realizar este trabajo. La construcción y mantenimiento de esas tablas de rutas es muy importante para los protocolos de ruteo distribuido.

El problema del encaminamiento es conectar un nodo con otro y se lo puede analizar bajo diferentes aspectos. El aspecto más simple es la conexión física de los nodos. En las redes con infraestructura se resuelve el problema de forma centralizada a través de matriz de conectividad. Esta matriz puede cambiar con el tiempo debido a variaciones del canal inalámbrico por efectos de desvanecimientos e interferencias, o debido a nodos móviles. Se deben tener en cuenta además algunos aspectos como la eficiencia energética, patrones de movimiento y la escalabilidad.

En las redes de sensores inalámbricas, la conservación de la energía, la cual está relacionada directamente con el tiempo de vida de la red, es considerada relativamente más importante que las otras características de la red en términos de calidad de datos enviados [42]. Los protocolos de encaminamiento se pueden clasificar en:

- **Proactivos:** están basados en tablas, son poco eficientes ya que generan nuevas tablas constantemente y consumen ancho de banda. Se tienen los siguientes: DSDV (Destination – Sequenced Distance – Vector Routing Protocol), CGSR (Clusterhead Gateway Switch Routing), WRP (Wireless Routing Protocol), OLSR (Optimized Link State Routing) y TBRPF (Topology Dissemination Based on Reverse – Path Forwarding).
- **Reactivos:** el encaminamiento se fundamenta en base a la demanda, o sea que si no hay rutas libres, entonces las construyen. Los protocolos más conocidos son: AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector Routing), DSR (Dynamic Source Routing), LQSR (Link Quality Source Routing Protocol), LMR (Lightweight Mobile Routing) y TORA (Temporary Ordered Routing Algorithm).
- **Orientado flujo:** cuando los nodos determinan el siguiente salto
- **Adaptivos:** el ruteo se adapta a la situación.
- **Híbridos:** pueden ser proactivos y reactivos.
- **Jerárquicos:** los protocolos tienen jerarquías dentro de la red y los nodos forman agrupaciones con identificaciones específicas para ser o no sumideros.
- **Geográficos:** solo conocen la posición de los nodos inmediatos independientemente del resto de la red. Se tiene GSPR (Greedy Perimeter).

El simulador de redes NS puede implementar los siguientes: DSDV, AODV y DSR.

Protocolo DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Routing Protocol)

Es un protocolo de vector distancia que utiliza una modificación del algoritmo de encaminamiento Vector Distancia Bellman-Ford utilizado en redes fijas, como por

ejemplo en el protocolo RIP. En este algoritmo, los nodos vecinos intercambian periódicamente sus tablas de encaminamiento enteras para estimar a la que se encuentran los demás nodos no vecinos. Este protocolo proporciona rutas sin bucles debido a la utilización de números de secuencia para la determinación de rutas más nuevas. DSDV proporciona un camino para cada destino y siempre elige el más corto basándose en el número de saltos hacia ese destino.

Protocolo AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector)

Es un protocolo de vector distancia cuya métrica se basa en el número de saltos, se activa únicamente cuando se requiere enviar paquetes, o sea bajo demanda. Los nodos mantienen una tabla de encaminamiento para los destinos conocidos utilizando el algoritmo de vector distancia. Se inicia con una tabla formada por sus vecinos donde se añaden nuevos cuando sea necesario, o sea cuando se requiera comunicación con otro nodo que no esté en la tabla, a través del descubrimiento de rutas (reactivo) hacia el destino concreto. Para que esto sea posible, se emiten paquetes de descubrimiento de rutas PREQ (Route Request) que contiene información del nodo origen, nodo destino, un número de secuencia del origen y un contador de saltos. Se divulga este mensaje a todos los nodos de la red, pero solamente existirá una respuesta PREQ (Route Reply) del nodo destino u otro que conozca la ruta correcta hacia el destino. Si el nodo origen recibe varios PREQ, se analiza cuál es el que tiene menor número de saltos y se asume como ruta. Si por el contrario no hay respuesta, en nodo origen reenvía su petición incrementando el número de secuencia para no ser desatendido. Las rutas encontradas se mantienen solamente por un tiempo a fin de prevenir que existan caminos incorrectos por efecto del movimiento de alguno de los nodos.

El protocolo AODV tiene la ventaja de reparar daños en la red, como por ejemplo si un nodo vecino detecta que un enlace está roto, tratará de descubrir una nueva ruta hacia el nodo con el que perdió el enlace.

Protocolo DSR (Dynamic Source Routing)

Se trata de un protocolo de fuente dinámica orientado a redes de gran cantidad de nodos (algunos cientos) móviles. Se fundamenta en el encaminamiento desde el origen, es decir, los paquetes de datos incluyen una cabecera de información con la información exacta de los nodos que debe atravesar. No requiere ningún tipo de mensajes periódicos (reactivo), disminuyendo así la sobrecarga con mensajes de control. A través de solicitar una ruta, ofrece la posibilidad de múltiples posibles caminos hacia el destino. Realiza encaminamiento en el origen insertando una cabecera en el paquete de datos que se colocará en la cabecera de transporte y la IP, además se incluye la ruta que debe seguir el paquete nodo a nodo. Las rutas se almacenan en una memoria cache debido al descubrimiento de rutas propias o de escuchas en la red.

2.9 Simulación de la red de sensores inalámbricos mediante NS2

Para la simulación de la red es importante definir algunos parámetros que indican el tipo de red con sus distintas características, como por ejemplo, el canal de comunicaciones, el modelo de propagación, el tipo de interface de la red, la capa MAC, el tipo de cola, el tipo de antena, el protocolo de enrutamiento, la topología de a red, etc.

Para la simulación de la red se ha escogido un total de 16 nodos sensores inalámbricos apostados en un área de aproximadamente 800 metros cuadrados en cada estación de monitoreo (en total son siete estaciones de monitoreo) que se halla a orillas del río Jubones en una extensión de aproximadamente 50 Km.

La topología de la red de sensores es fija y se halla mostrada en la Figura 2.21. El *nodo 0* funciona como Gateway (sumidero) de toda la información recopilada por todos los sensores de esa estación de monitoreo. El *nodo 4* recolecta toda la información generada por las sondas de Nitratos, PH, Oxígeno Disuelto, temperatura, humedad relativa y luz solar en el sitio específico de la estación de monitoreo.

El nodo 0 se conecta inalámbricamente a la PC que a su vez se halla conectada a un equipo de radio en 2.4GHz; este equipo se conecta con otros similares y depositan toda

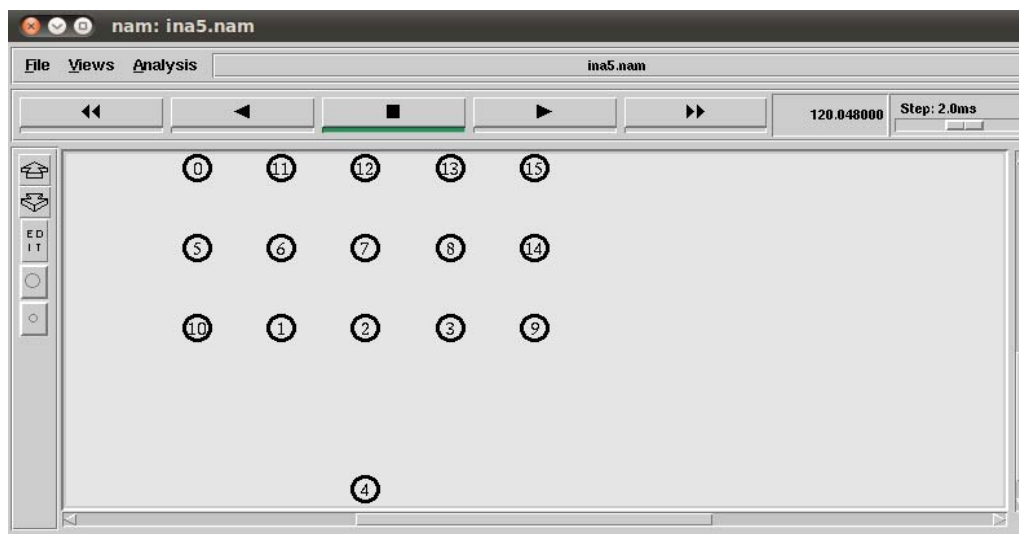


Figura 2. 21 Topología de red de sensores en cada estación de monitoreo.

su información en el nodo central en una PC para su posterior procesamiento de la información de la Universidad de Machala.

PARTE III
RESULTADOS

PARTE III

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este trabajo están compuestos por el conjunto de equipos y accesorios de mediciones de las variables físicas: Nitratos, Oxígeno Disuelto, niveles de acides pH de las aguas de ríos, temperatura ambiental, humedad relativa y luz solar en cada estación de monitoreo. Además los equipos de comunicaciones que permiten transportar toda la información recolectada en cada estación, los sistemas de respaldo de energía y accesorios adicionales como torres, antenas, conectores y cables.

Otros resultados constituyen los estudios de propagación de los diez radioenlaces necesarios para enlazar las siete estaciones de monitoreo, cuatro repetidoras y una estación central de recolección total de datos. La distancia total de cobertura de la red de telecomunicaciones diseñada es de aproximadamente 50 Km a lo largo del río Jubones de la provincia de El Oro en Ecuador.

Finalmente se tiene la simulación del comportamiento de la red de sensores WSN en cada estación de monitoreo, donde se analizan algunos parámetros que tienen que ver con la calidad del servicio de la red diseñada.

3.1 Diseño de la red de monitoreo de pesticidas en zonas bananeras del Ecuador

El diseño de la red de monitoreo contempla algunos aspectos como por ejemplo, el entorno de despliegue de la red, la cobertura, la topología, el número de sensores por unidad de distancia, las variables a ser medidas, la frecuencia de actualización de estas variables, el sistema de alimentación eléctrico por cada unidad de monitoreo.

3.1.1 Planificación de la red

La planificación empieza por analizar el entorno de despliegue de la red que comienza en el poblado de Pindo (Estación U11, elevación 517 m) al límite provincial entre las provincias de Azuay y El Oro. Se definen estaciones de monitoreo a lo largo del río básicamente cerca de los poblados ya que esto brinda ventajas como seguridad de los equipos y facilidad en el mantenimiento. Una vez definidos los puntos de las estaciones de monitoreo de pesticidas, se define la topología de la red de sensores que apostados entre el agua del río y su rivera, permiten conformar una serie de medidas que caracterizarán en el espacio y el tiempo algunos aspectos concernientes a la calidad del agua del río Jubones.

3.1.2 Entorno de despliegue

Para el entorno de despliegue de la red de monitoreo, se ha escogido una zona bananera de la provincia del El Oro según se indica en la Figura 3.1.

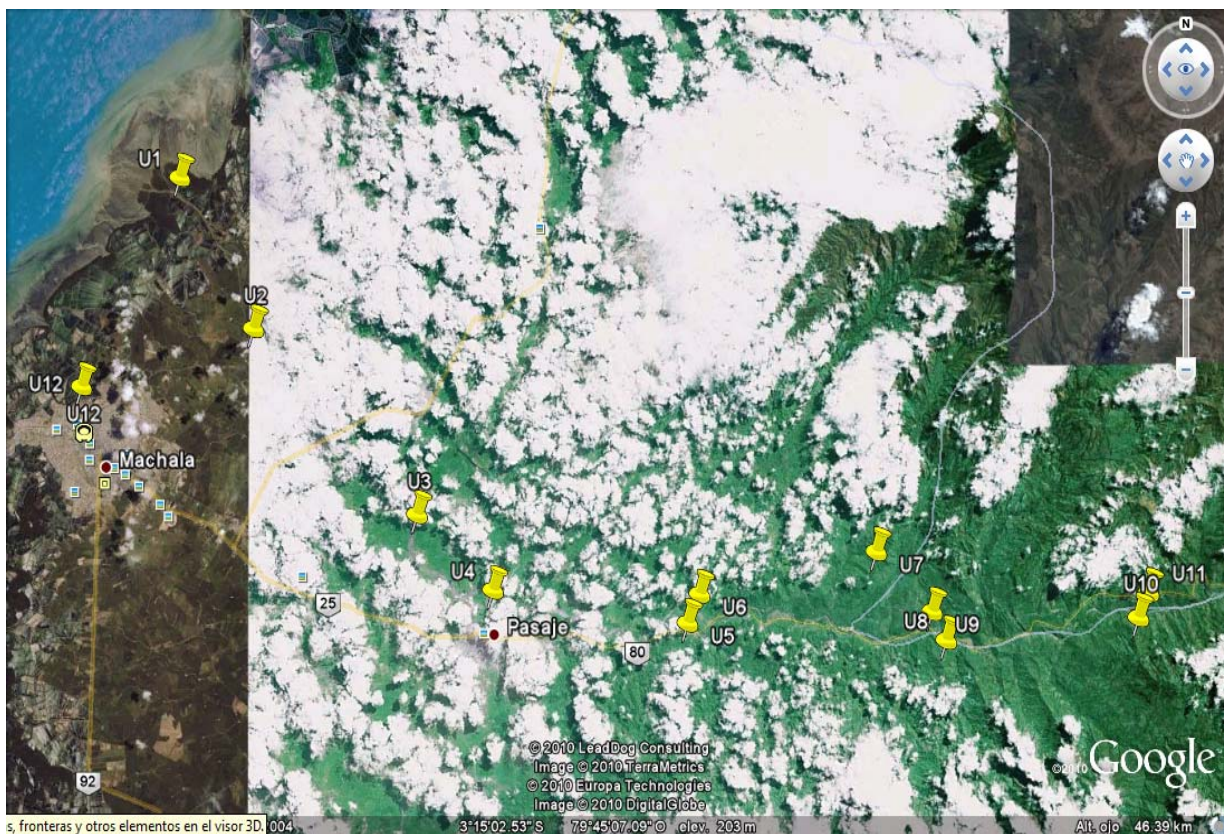


Figura 3. 1Entorno de despliegue de la red de monitoreo en una región bananera de la provincia de El Oro.

La Figura 3.1 muestra los puntos escogidos para cada estación de monitoreo y repetidoras de la red de telecomunicaciones.

Las estaciones de monitoreo y puntos de repetición se muestran a continuación:

- ✓ **ESTACIONES DE MONITOREO:** son U1, U2, U3, U4, U6, U9 y U11. Estos sitios de monitoreo tienen además un conjunto de sensores que recopilarán información de variables como temperatura, luz ambiental y humedad.
- ✓ **REPETIDORAS:** existen cuatro estaciones repetidoras U5, U7, U8 y U10.
- ✓ **RECOLECCIÓN CENTRAL:** el sumidero de toda la información recolectada es U12 correspondiente a la Universidad Técnica de Machala donde se puede realizar el procesamiento de la información recolectada.

Resultados

En la Tabla 3.1 se indican las coordenadas de los sitios designados para la red de sensores. Existen puestos de medición de la calidad del agua del río con sondas y sensores, y otros puntos destinados a repetidoras. Cabe anotar que la diferencia de alturas entre la estación U11 y U1 es de 550 m.

UNIDAD	NOMBRE	FUNCION	COORDENADAS	
E1	Hacienda La Raquel	Estación de medición	3°10'21",S; 79° 55'37", O	-3.1725°;-79.9269°
E2	Hacienda Matales	Estación de medición	3°13'30",S; 79° 53'52.7", O	-3.2250°;-79.8979°
E3	Hacienda San Antonio	Estación de medición	3°17'22.4",S; 79° 50'1.3", O	-3.2895°;-79.8336°
E4	Hacienda Cleotilde (Pasaje)	Estación de medición	3°18'56.8",S; 79° 48'14", O	-3.3157°;-79.8038°
R1	Cerro Casacay	Repetidor	3°19'37",S; 79° 43'39.2", O	-3.3269°;-79.7275°
E5, U6	Caserío Casacay	Estación de medición	3°19'1",S; 79° 43'22.3", O	-3.3169°;-79.7228°
R2, U7	Caserío de Porotillo	Repetidor	3°18'6.9",S; 79° 39'15.7", O	-3.3019°;-79.6543°
R3, U8	Cerro de Porotillo	Repetidor	3°19'56.2",S; 79° 37'38.3", O	-3.3322°;-79.6273°
E6, U9	Caserío de Porotillo	Estación de medición	3°19'21.8",S; 79° 37'55.8", O	-3.3227°;-79.6321°
R4, U10	Cerro de Pindo	Repetidor	3°19'25.6",S; 79° 33'16.3", O	-3.3237°;-79.5545°
E7, U11	Caserío Pindo	Estación de medición	3°18'55.9",S; 79° 32'58.8", O	-3.3155°;-79.5496°
Nodo Central, U12	Universidad de Machala	Nodo Central	3°14'42.5",S; 79° 57'56", O	-3.2451°;-79.9655°

Tabla 3. Ubicaciones de cada estación de monitoreo y repetidora.

En la Figura 3.2 se observan las poblaciones localizadas en la zona del emplazamiento de la red de monitoreo de la calidad del agua del río Jubones.

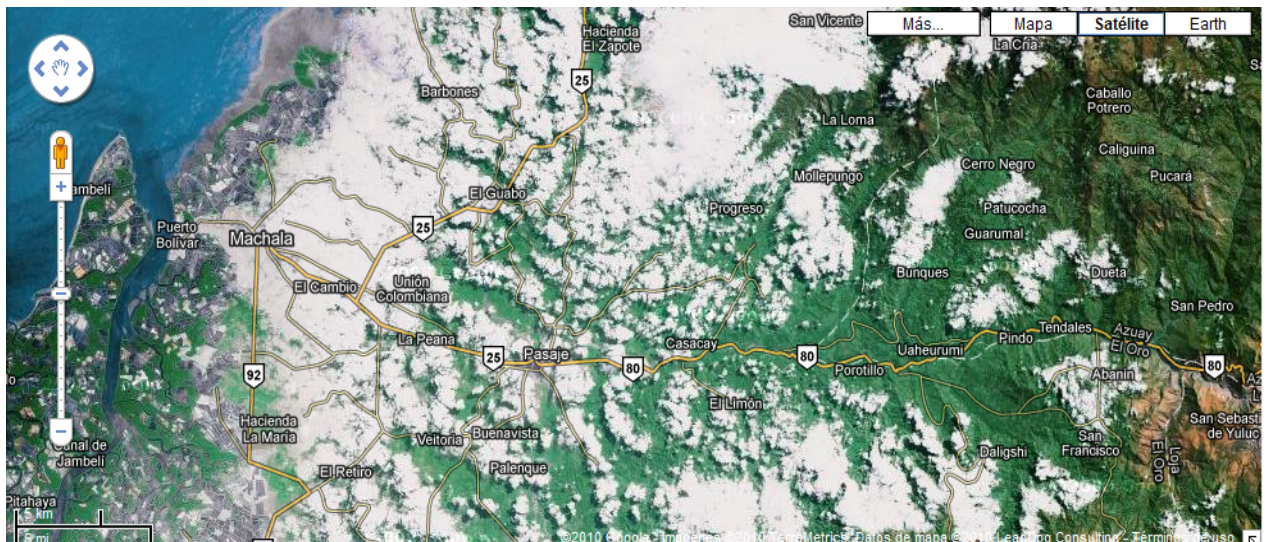


Figura 3. 2 Poblados dentro de la zona de despliegue de la red.

Para el análisis y evaluación de los emplazamientos propuestos en esta red de monitoreo, se utilizará la aplicación Radio Mobile versión 8.9.3.

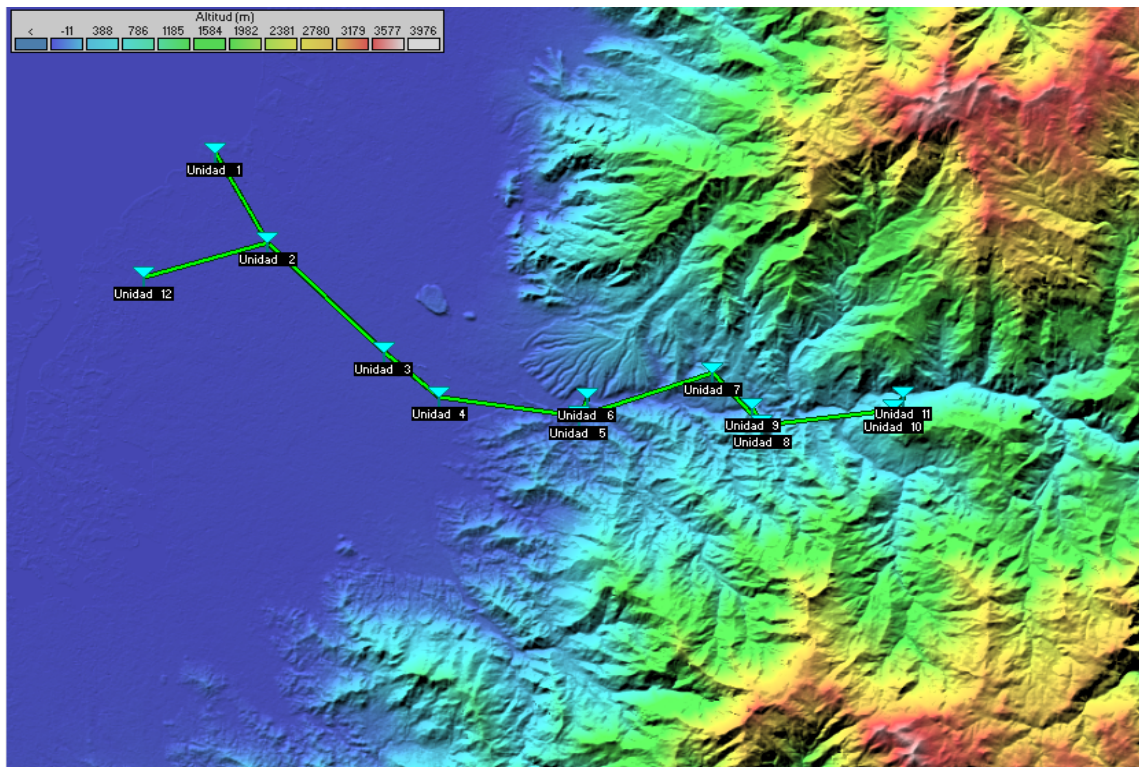


Figura 3. 3 Despliegue de la red de monitoreo utilizando Radio Mobile.

La Figura 3.3 muestra la totalidad de la red desplegada a lo largo del río. Se observa que las primeras mediciones (U11) se realizan en una zona libre de plantaciones bananeras. Estas medidas servirán para realizar comparaciones con medidas posteriores.

La distancia de cobertura de la red de monitoreo a lo largo del río Jubones alcanza los 50 Km. Es necesario por lo tanto la utilización de repetidores y amplificadores de RF para alcanzar las distancias que normalmente no se alcanzarían con los sensores y su escasa potencias.

3.1.3 Esquema general de la red

En la Figura 3.4 se encuentra un esquema general de la red de datos que incluye las estaciones de monitoreo de variables físicas, las estaciones que contienen equipos repetidores y una estación que hace de sumidero de toda la información recopilada.

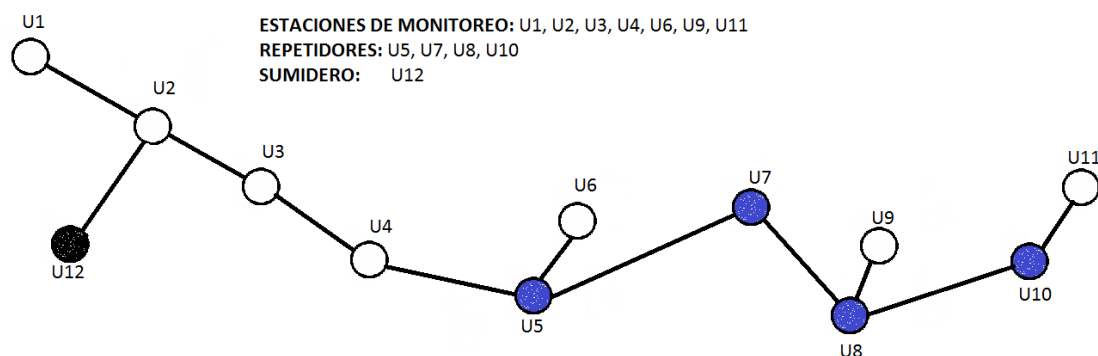


Figura 3. 4 Despliegue general de la red de monitoreo.

Los equipos que conforman las estaciones de monitoreo U1, U2, U3, U4, U6, U9 y U11 se muestran en la Figura 3.5.

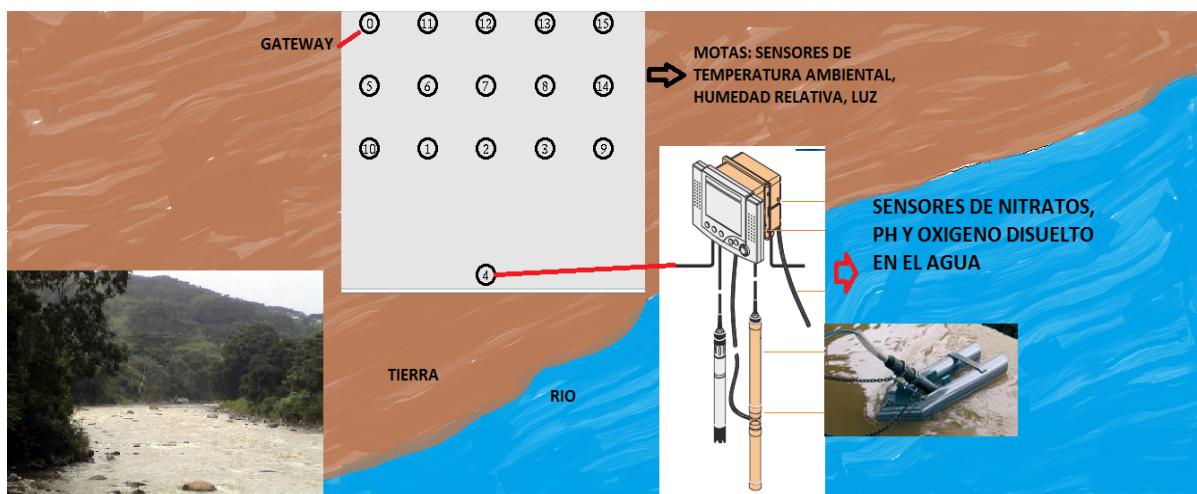


Figura 3. 5 Dispositivos WTW para sensar presencia de Nitratos, Oxígeno Disuelto, nivel de acidez del agua (PH). Sensores inalámbricos Crossbow para sensar Temperatura ambiental, luz y humedad relativa.

Se debe considerar que las orillas del río son distintas en cada zona geográfica donde se colocarán los sitios de monitoreo. Esto quiere decir que la zona de propagación de las señales electromagnéticas se verá muy afectada por la vegetación del lugar si no se prepara suficientemente el lugar.

Se deberá tomar en cuenta este factor para la selección del canal de propagación en el simulador NS2 ya que no siempre existirá línea de vista solamente.

En la Figura 3.6 se muestra otro esquema que indica la forma de conectar los componentes del sistema de medición de variables físicas, la recolección inalámbrica de datos, el interface a la PC y la conexión al Ruteador para su transmisión a los puntos de repetición.

Resultados

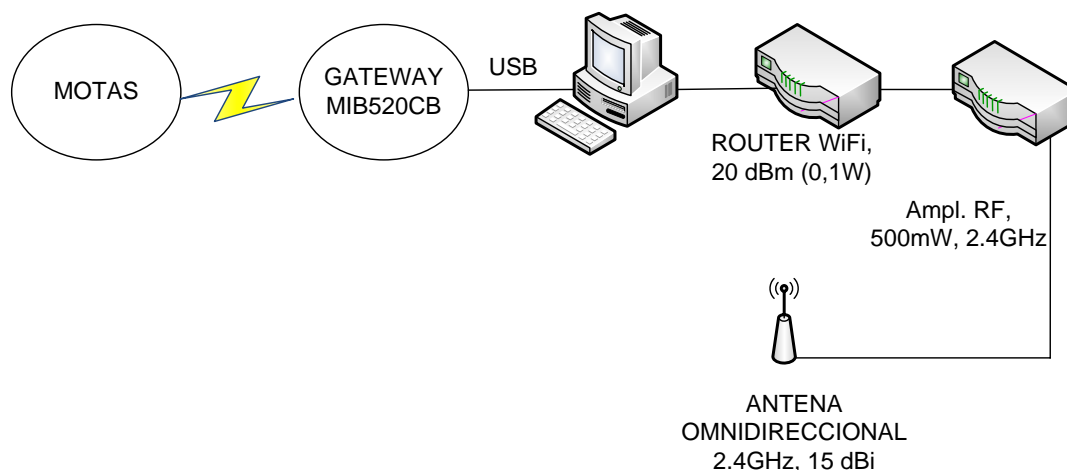


Figura 3. 6Conexión de equipos de medición y transmisión inalámbrica.

La Figura 3.6 muestra los componentes de una estación de medición donde se utiliza un amplificador de radiofrecuencia a 2.4 GHz y 500 mW de potencia máxima de salida. Esto ayuda a mejorar la cobertura de cada estación de medición.

Los equipos necesarios para las repetidoras estarán compuestos por el Router, amplificador de RF y antena omnidireccional como se muestra en la Figura 3.7.

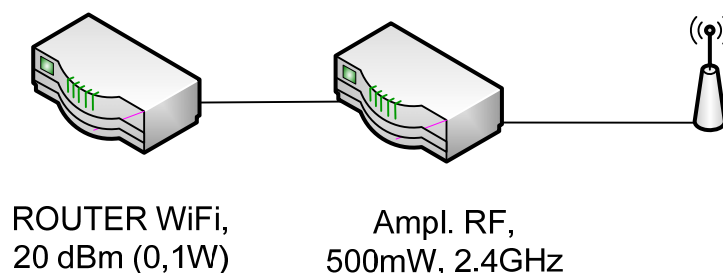


Figura 3. 7Equipos necesarios para las repetidoras en 2.4 GHz.

Las especificaciones del amplificador de RF se muestran en la siguiente Tabla 3.2.

La Tabla 3.2 muestra las especificaciones técnicas del amplificador de radiofrecuencia donde se puede observar su frecuencia de trabajo de 2.4 GHz a 2.5 GHz, ganancia de transmisión de 17 dB, ganancia de recepción de 15 dB y potencia de salida de 500 mW que se ajustan a las necesidades del sistema de comunicaciones.

Tecnical Specifications Amp. RF	
Features:	802.11g 500mW Outdoor
Operating Range:	2400 - 2500 MHz
Operating Mode:	Bi - directional, TDD
Transmit Gain:	17 dB
Frequency Response:	+/- 1 dB
Output Power:	500 mW (+ 27 dBm)
Tx Input Power:	10 dBm
Receive Gain:	15 dB typical
Noise Figure:	3.5 dB typical
LED indicators:	RED: Solid On: Power & Receive Mode; GREEN/ORANGE: Blinking: Transmitting
Connectors:	N-type, female, 50 Ohms
Lighthing Protection:	Quarter Wave Technology
DC Surge Protection:	Available
Power Consumption:	Tx=1.2A, Rx=130mA @ 9VDC
Operating Temperature:	- 40 deg to + 70 deg
AMP Dimensions:	4.25" L x 3.25" W x 1.75" H

Tabla 3. 2Especificaciones del amplificador de RF[43]

3.1.4 Red de transporte

Está compuesta por 12 sistemas de transmisión y recepción de datos a la frecuencia de 2.4 GHz. De estos sistemas, 7 corresponden a estaciones de monitoreo de variables ambientales, 4 estaciones de repetición, y una estación para recopilación total de la información generada para su posterior tratamiento conformando una base de datos.

Una vez establecidos los 12 puntos de localización de las distintas estaciones, es necesario realizar un estudio de propagación para analizar la calidad de cada radioenlace mediante una herramienta de software.

3.1.5 Estudio de propagación con Radio Mobile

Para el estudio de la propagación se considerarán factores como la ubicación de cada uno de los nodos centrales de monitoreo, la reglamentación local y nacional para sistemas de comunicaciones fijos y móviles en 2.4 GHz, modelos estadísticos de propagación, etc.

Las ubicaciones de cada una de las unidades de medida se han escogido cercanas a poblaciones que disponen de tendidos eléctricos y que pueden brindar seguridad de los equipos instalados.

El objetivo es planificar una red inalámbrica a lo largo de un tramo de 50 Km en la provincia de El Oro para enlazar puntos de medición de la calidad de agua del río Jubones utilizando sensores inalámbricos con el estándar IEEE 802.15.4.

3.1 6 Especificaciones a considerarse en Radio Mobile

Se han considerado las siguientes especificaciones:

- La frecuencia de operación de halla entre 2.4 GHz a 2.483 GHz.
- Modo estadístico: difusión
- Requisito de variabilidad: 90% del tiempo, 90% de las localizaciones, 80% del resto de las situaciones.
- Parámetros del suelo: por defecto.
- Pérdidas adicionales: ninguna.
- Estilo de la presentación: enlace verde si la señal relativa es mayor que 15 dB, amarillo si es mayor que 5 dB y rojo por debajo de 5 dB.
- Utilizar LandCover para mejorar el modelado de las características del suelo.

Respecto de la potencia de transmisión en la banda de 2.4 GHz y las ganancias de las antenas, la legislación ecuatoriana a través del Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL) en la Normativa 34 *Norma para la Implementación y operación de sistemas de modulación digital de banda ancha*, en el Anexo 1, ítem i) indica lo siguiente: “Si la ganancia de la antena direccional exclusivamente en los sistemas fijos punto-punto y que operan en la banda 2400-2483.5 MHz es superior a 6 dBi, deberá reducirse la potencia máxima de salida del transmisor, esto es 1W, en 1 dB por cada 3 dB de ganancia de la antena que exceda los 6 dBi ”.

Para nuestro caso utilizaremos antenas omnidireccionales de 15 dBi, o sea que se excede en 9 dB a los 6 dBi máximos. Esto significa que debe reducirse la potencia del transmisor de 30 dBm (1 W), a lo siguiente: $30 \text{ dB} - (9/3) \text{ dB} = 27 \text{ dBm}$.

Para las simulaciones siguientes se utilizará una potencia del transmisor de 20 dBm, así de esta manera resguardamos la vida útil del transmisor. Se utilizará también una antena omnidireccional de 15 dBi.

Para el estudio de propagación con Radio Mobile, se ha configurado la herramienta en base a las especificaciones descritas en este mismo apartado. La consideración de potencia relativa de 15 dB puede resultar exigente, pero considerando que la zona de trabajo es la región costa con temperaturas que pueden cambiar entre 18 grados y 34 grados a lo largo del año, este valor de 15 dB nos da un margen favorable frente a las variaciones de la temperatura fundamentalmente.

Al considerar el valor más bajo de sensibilidad de los equipos en -104 dBm, se espera obtener comunicación en los radio enlaces, aunque éstos sean a la velocidad más baja. Es importante recordar que al tratarse de mediciones de variables medio ambientales, no es tan importante su velocidad, más bien la certeza de sus mediciones.

A continuación se presentan los resultados del análisis de los radioenlaces en base a Radio Mobile. Los comentarios a los resultados encontrados se lo hace al final a través de un cuadro resumen de todos los emplazamiento.

Enlace Unidad1 (Hacienda La Raquel) y Unidad2 (Hacienda Matales)

Resultados

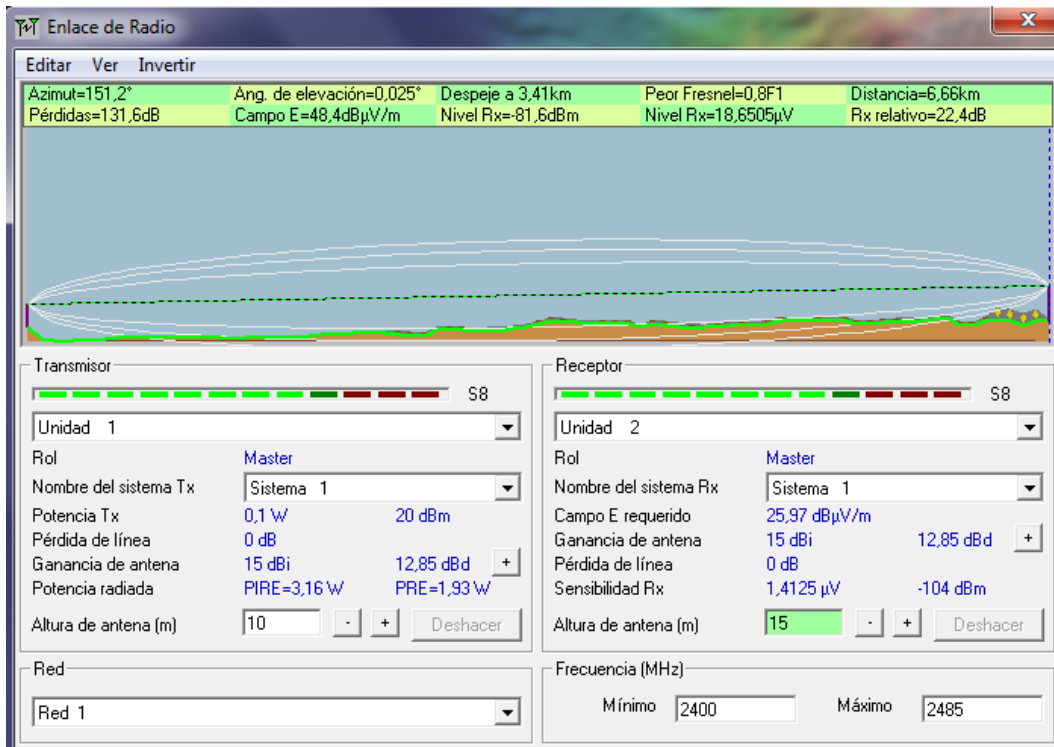


Figura 3. 8 Enlace Unidad1 a Unidad2

Enlace Unidad1 (Hacienda La Raquel) y Unidad12 (Universidad de Machala)

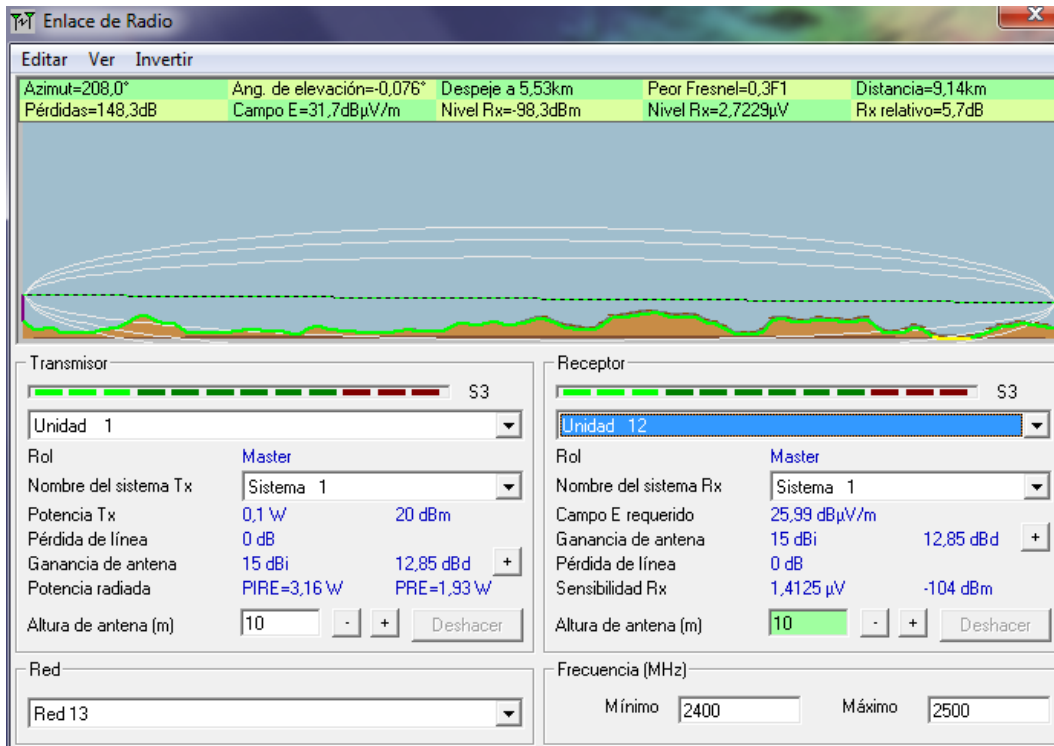


Figura 3. 9 Enlace Unidad1 a Unidad12.

Enlace Unidad2 (Hacienda Matales) y Unidad 12 (Universidad de Machala)

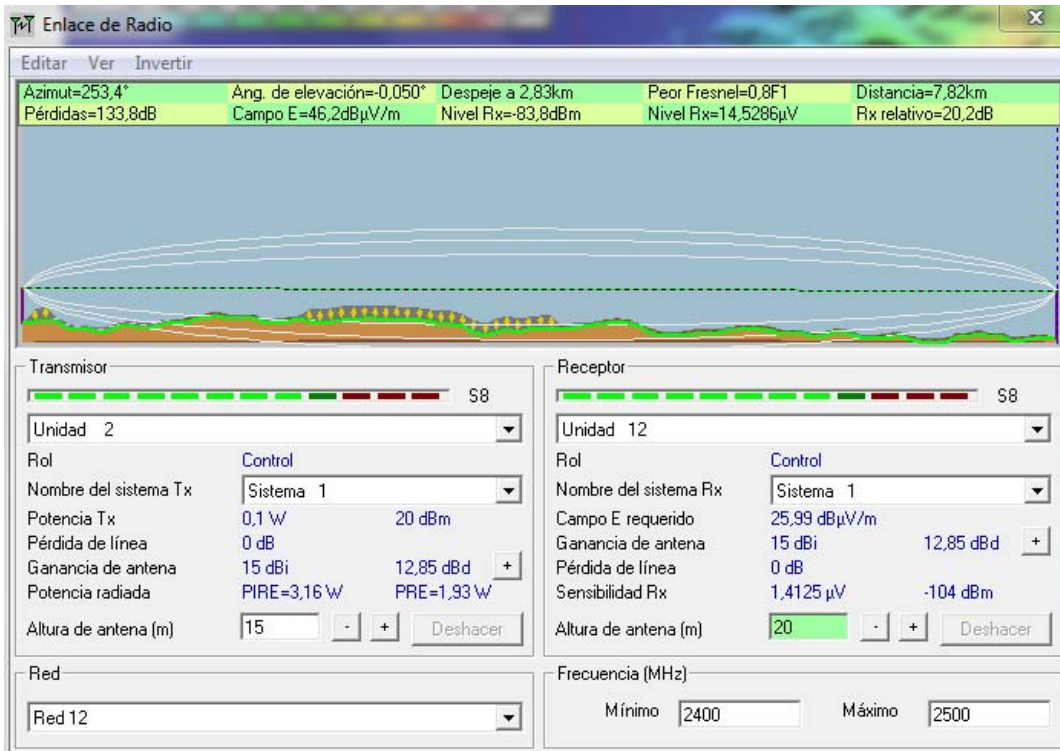


Figura 3. 10 Enlace Unidad2 a Unidad12

Enlace Unidad2 (Hacienda Matales) y Unidad 3 (Hacienda San Antonio)

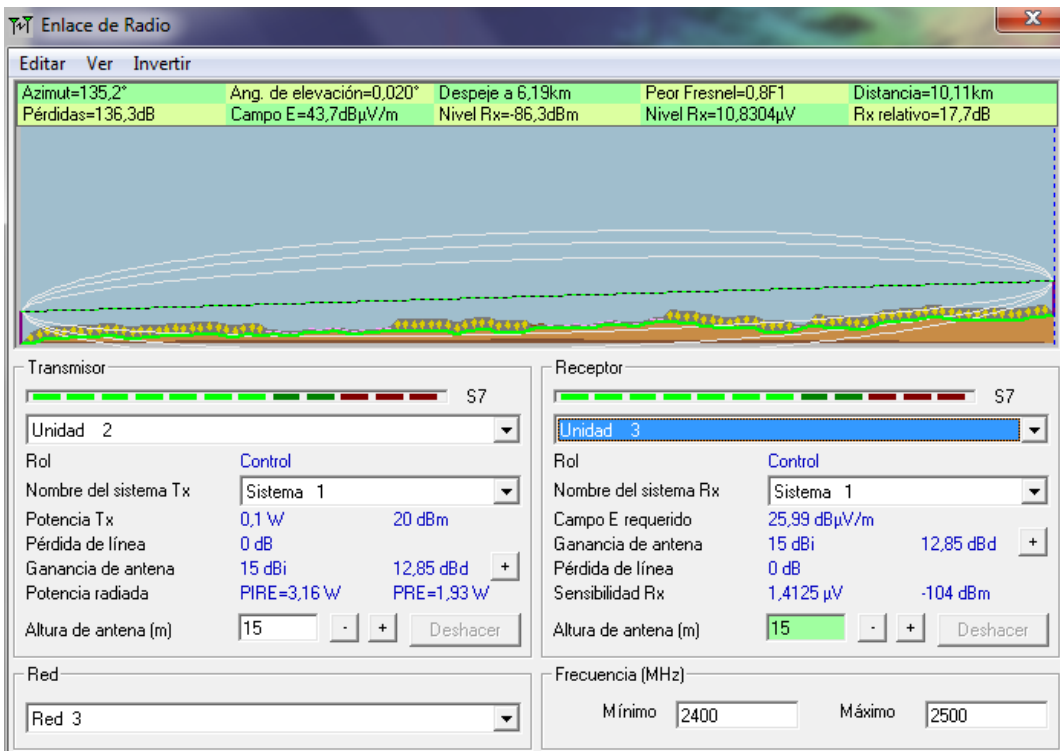


Figura 3. 11 Enlace Unidad2 a Unidad3

Enlace Unidad2 (Hacienda Matales) y Unidad 4 (Hacienda Cleotilde)

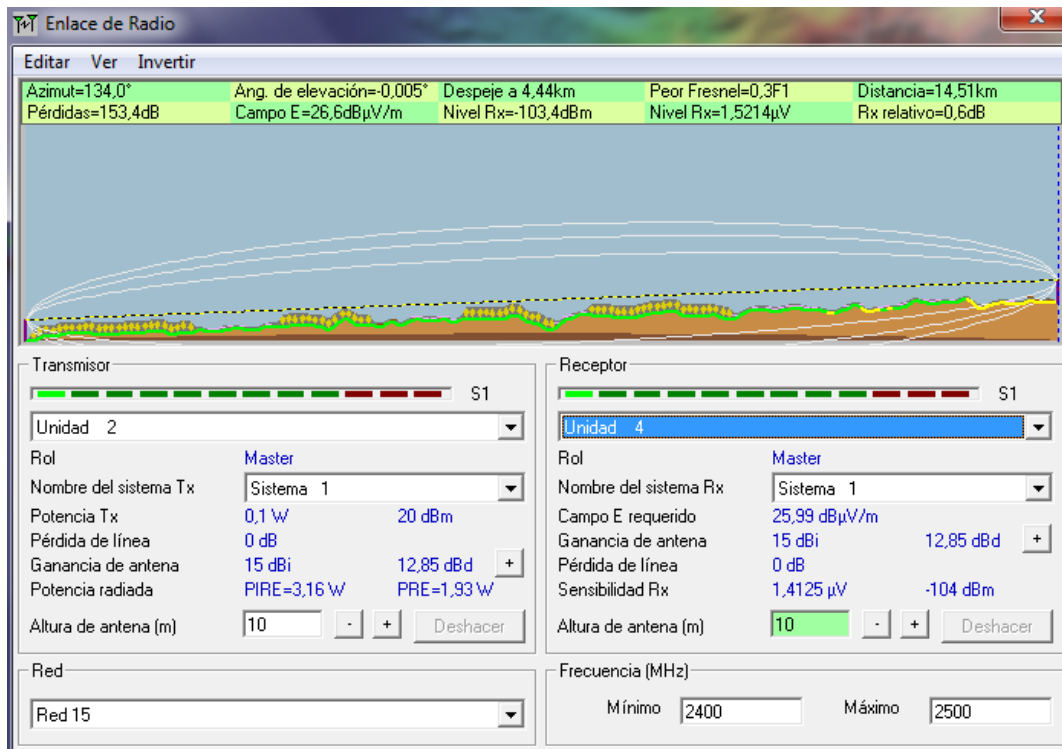


Figura 3. 12 Enlace Unidad2 a Unidad4

Enlace Unidad2 (Hacienda Matales) y Unidad 5 (Cerro Casacay)

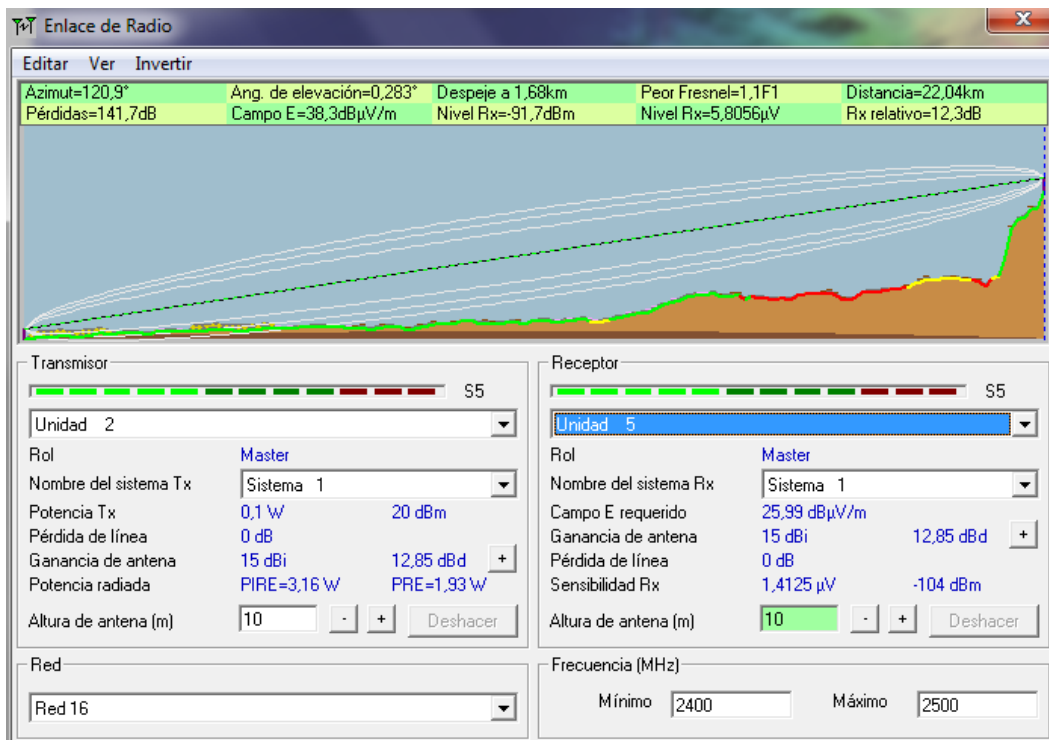


Figura 3. 13 Enlace Unidad2 a Unidad5

Resultados

Enlace Unidad3 (Hacienda San Antonio) y Unidad4 (Hacienda Cleotilde – Pasaje)

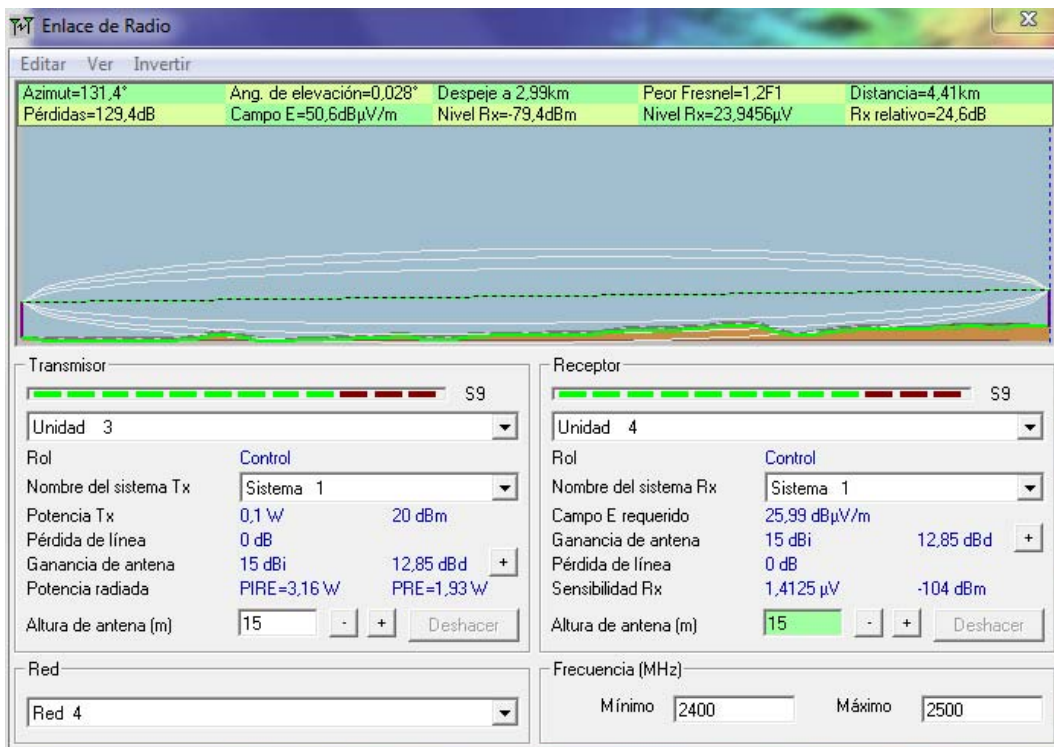


Figura 3. 14 Enlace Unidad3 a Unidad4

Enlacen Unidad3 (Hacienda San Antonio) y Unidad5(Cerro Casacay)

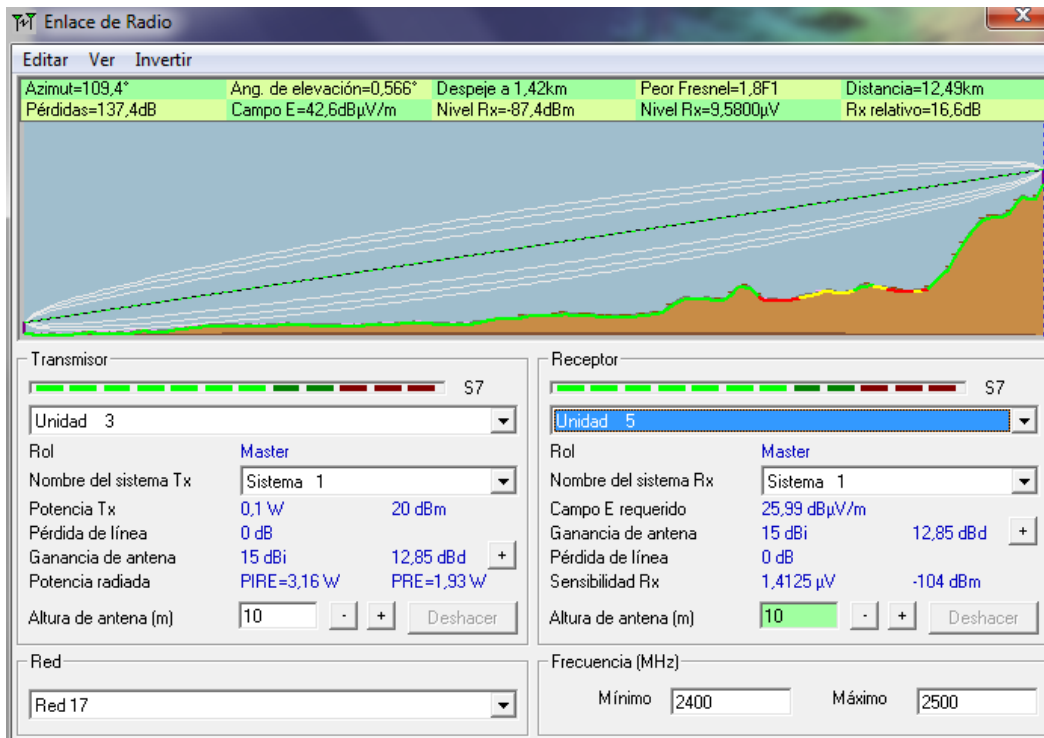


Figura 3. 15 Enlace Unidad3 a Unidad5

Resultados

Enlace Unidad4 (Hacienda Cleotilde – Pasaje) y Unidad5 (Cerro de Casacay)

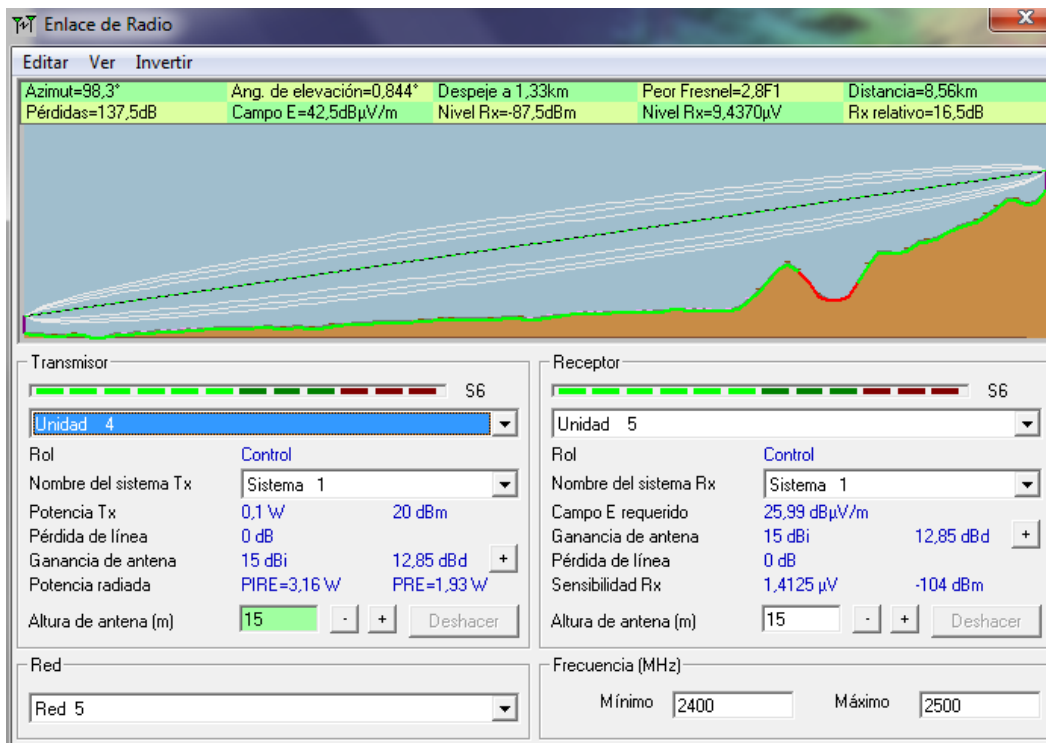


Figura 3. 16 Enlace Unidad4 a Unidad5

Enlace Unidad5 (Cerro de Casacay) y Unidad6 (Caserío Casacay)

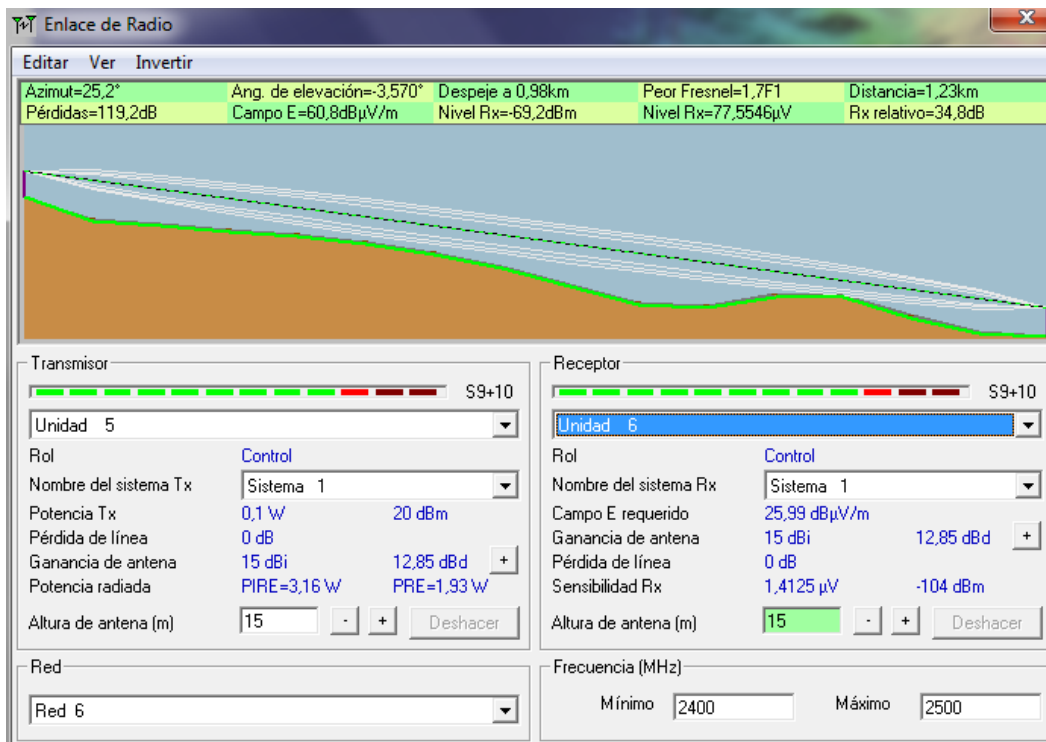


Figura 3. 17 Enlace Unidad5 a Unidad6

Resultados

Enlace Unidad5 (Caserío Casacay) y Unidad7 (Caserío de Porotillo)



Figura 3. 18 Enlace Unidad5 a Unidad7

Enlace Unidad7 (Caserío de Porotillo) y Unidad8 (Cerro Porotillo)

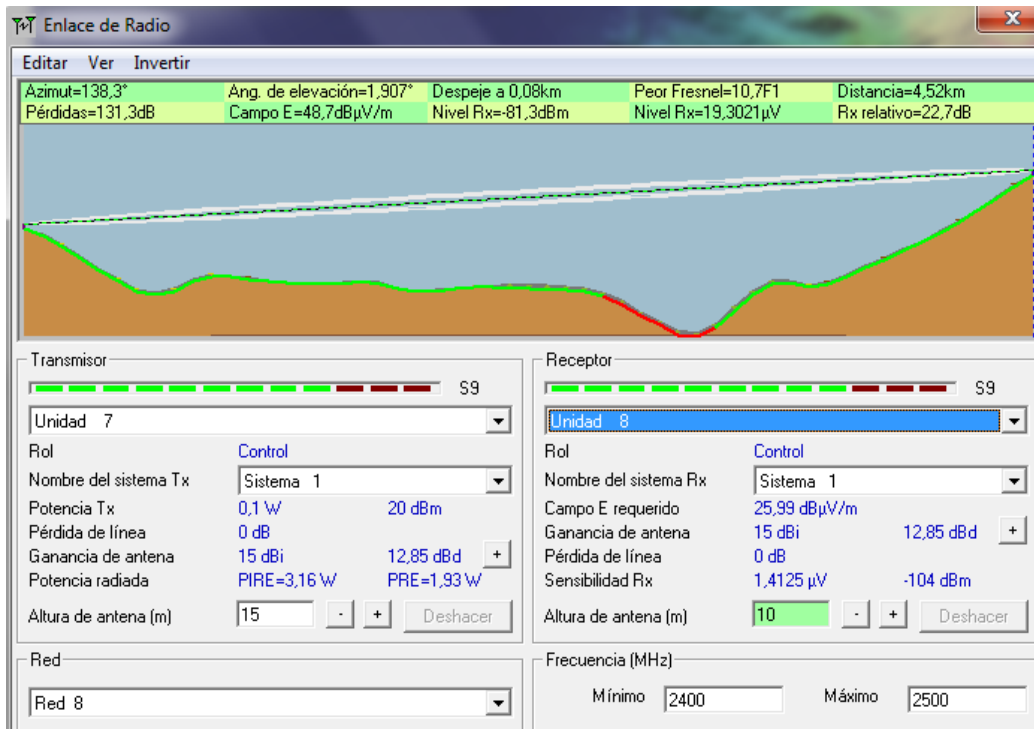


Figura 3. 19 Enlace Unidad7 a Unidad8

Resultados

Enlace Unidad8 (Cerro Porotillo) y Unidad9 (Caserío Porotillo)

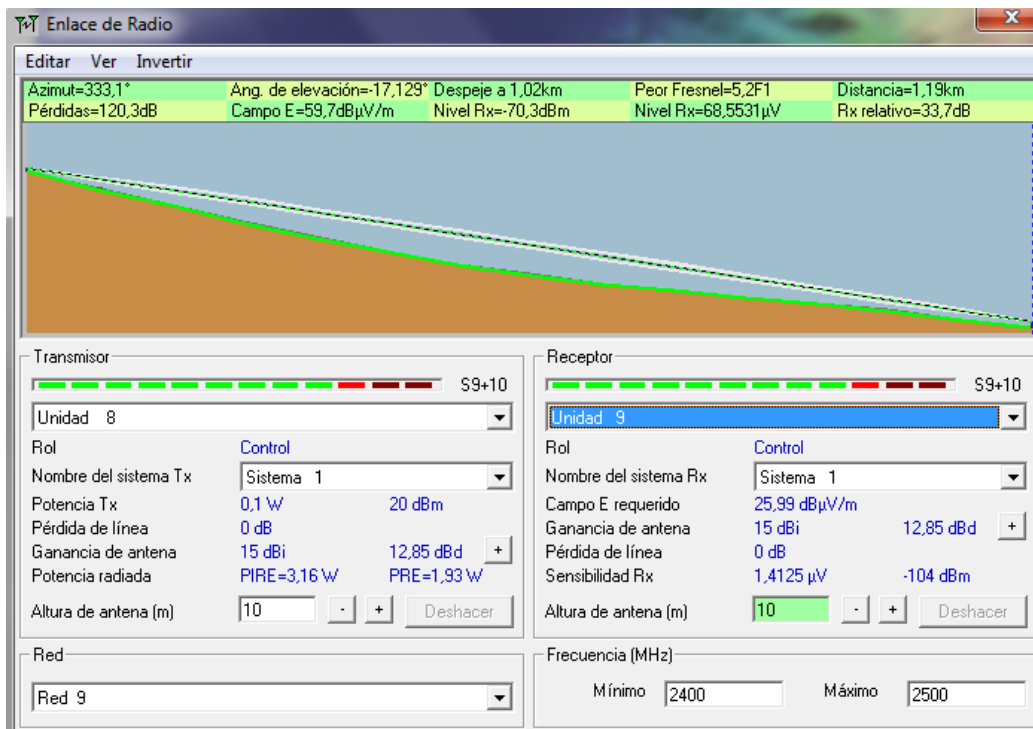


Figura 3. 20 Enlace Unidad8 a Unidad9

Enlace Unidad8 (Cerro Porotillo) y Unidad10 (Cerro de Pindo)

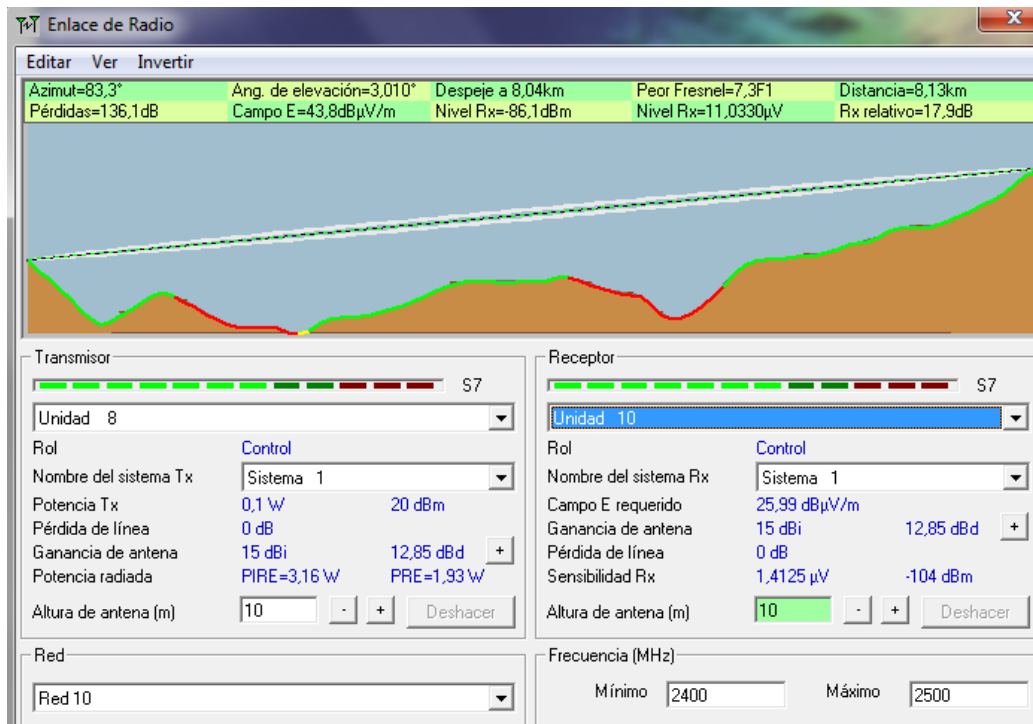


Figura 3. 21 Enlace Unidad8 a Unidad10

Enlace Unidad10 (Cerro de Pindo) y Unidad11 (Caserío Pindo)

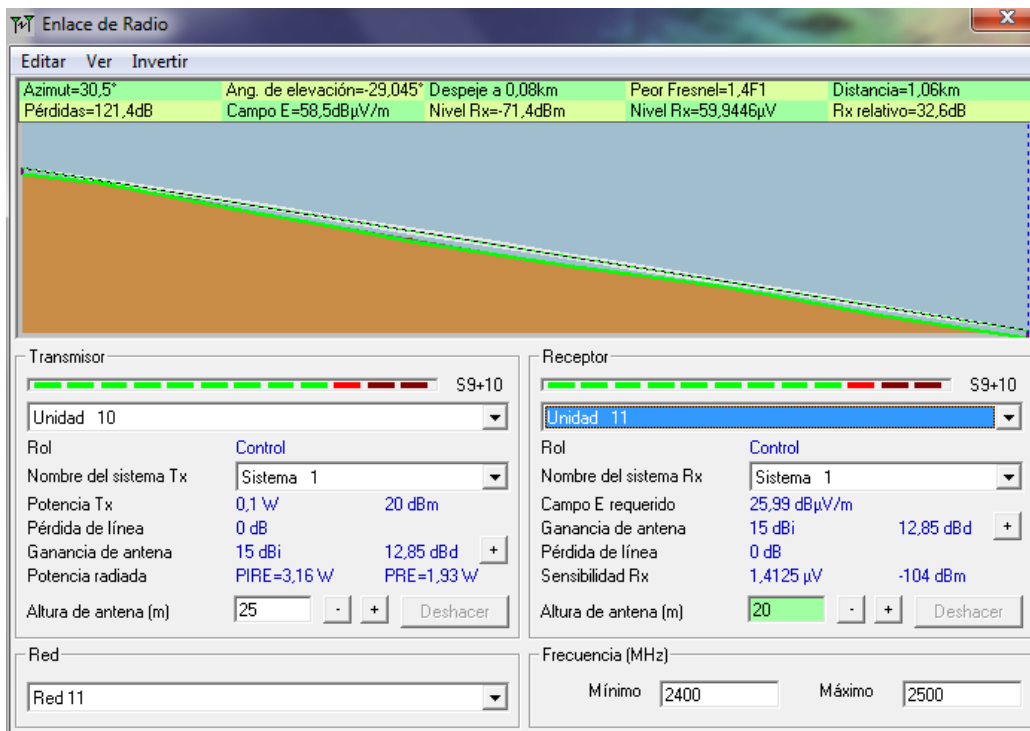


Figura 3. 22 Enlace Unidad10 a Unidad11

Enlace Unidad12 (Universidad de Machala) y Unidad3 (Hacienda San Antonio)

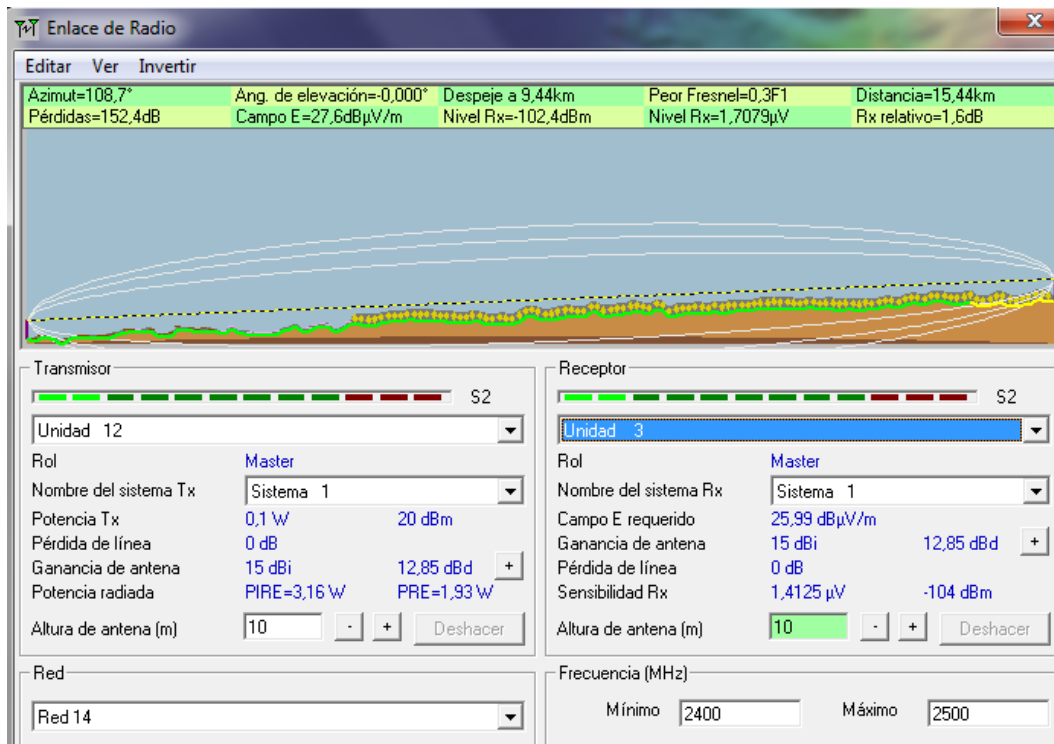


Figura 3. 23 Enlace Unidad12 a Unidad3

Resultados

Los resultados obtenidos de los radio enlaces anteriores se muestran en la Tabla 3.3.

Item	Enlace	Distancia (Km)	htx, hrx	Peor Fresnel	Campo E dBuV/m	Prx relativo (dB)	Nivel de Rx (dBm)
1	Unidad1, Unidad2	6,66	10m, 15m	0,8F1	48,40	22,40	-81,6
2	Unidad1, Unidad12	9,14	10m, 10m	0,3F1	31,70	5,70	-98,3
3	Unidad2, Unidad12	7,82	15m, 20m	0,8F1	46,20	20,20	-83,8
4	Unidad2, Unidad3	10,11	15m, 15m	0,8F1	43,70	17,70	-86,3
5	Unidad2, Unidad4	14,51	10m, 10m	0,3F1	26,60	2,30	-101,70
6	Unidad2, Unidad5	22,04	10m, 10m	1,1F1	38,00	12,00	-92
7	Unidad3, Unidad4	4,41	15m, 15m	1,2F1	50,60	24,60	-79,4
8	Unidad3, Unidad5	12,49	10m, 10m	1,8F1	42,60	16,60	-87,4
9	Unidad4, Unidad5	8,56	15m, 15m	2,8F1	42,50	16,50	-87,5
10	Unidad5, Unidad6	1,23	15m, 15m	1,7F1	60,80	34,80	-69,2
11	Unidad5, Unidad7	8,58	15m, 15m	3,9F1	44,00	18,00	-86
12	Unidad7, Unidad8	4,52	15m, 10m	10,7F1	48,70	22,70	-81,3
13	Unidad8, Unidad9	1,19	10m, 10m	5,2F1	59,70	33,70	-70,3
14	Unidad8, Unidad10	8,13	10m, 10m	7,3F1	43,80	17,90	-86,1
15	Unidad10, Unidad11	1,06	25m, 20m	1,4F1	58,50	32,60	-71,4
16	Unidad12, Unidad3	15,44	10m, 10m	0,3F1	27,60	1,60	-102,4
	Gtx = Grx = 15 dBi						
	Ptx = 20 dBm						
	Sensibilidad del receptor = - 104 dBm						

Tabla 3. 3Cuadro resumen de los cálculos de propagación de la Red.

La Tabla 3.3 muestra un resumen de los cálculos realizados por Radio Mobile donde se han resumido algunos parámetros como distancia (Km), alturas de las antenas transmisora y receptora (m), despejamiento de la primera zona de Fresnel, campo eléctrico (dBuV/m), potencia relativa de recepción (dB) y el nivel de potencia de recepción (dBm). Las ganancias de las antenas son fijadas en 15 dBi, la potencia de los equipos de transmisión está en 20 dBm, la sensibilidad en -104 dBm.

Como se puede observar en el Tabla 3.3, los ítems 2, 5 y 16 corresponden a radioenlaces cuya potencia de recepción es más baja que la sensibilidad de - 104 dBm. Estos radioenlaces se pueden apreciar en la Figura 3.24 en colores rojo y amarillo-negro, que no pueden tomarse en cuenta para enlaces redundantes.

El radioenlace con mejor potencia de recepción es el número 15, con un valor de - 71.4 dBm. Corresponde justamente al radioenlace más corto.

En la Tabla 3.4 se muestran algunos parámetros de la sensibilidad del equipo DWL-2100AP. Con estos valores de la sensibilidad se pueden estimar la capacidad de transporte de datos por cada radioenlace.

El radioenlace de U2 a U5 podría utilizarse como un enlace redundante con una potencia de recepción de - 92 dBm. Es un valor bajo, pero podría servir en caso de fallas de las unidades U3 y U4.

SENSIBILIDAD DEL ACCESS POINT DWL-2100 AP
54 Mbps, OFDM, 10% PER, -66 dBm
48 Mbps, OFDM, 10% PER, -71 dBm
36 Mbps, OFDM, 10% PER, -76 dBm
24 Mbps, OFDM, 10% PER, -80 dBm
18 Mbps, OFDM, 10% PER, -83 dBm
12 Mbps, OFDM, 10% PER, -85 dBm
11 Mbps, CCK, 8% PER, -83 dBm
9 Mbps, OFDM, 10% PER, -86 dBm
6 Mbps, OFDM, 10% PER, -87 dBm
2 Mbps, QPSK, 8% PER, -89 dBm

Tabla 3. 4Característica de sensibilidad del AP DWL-2100.

Para la potencia más baja registrada en la Tabla 3.3 de -87.4 dBm, equivale a una velocidad de 6 Mbps. Para la potencia más alta registrada en la misma tabla de -69.2 dBm, equivale a una velocidad de 48 Mbps aproximadamente.

La red de transporte de datos final que incluye las posibles conexiones inalámbricas se muestra en la Figura 3.24.

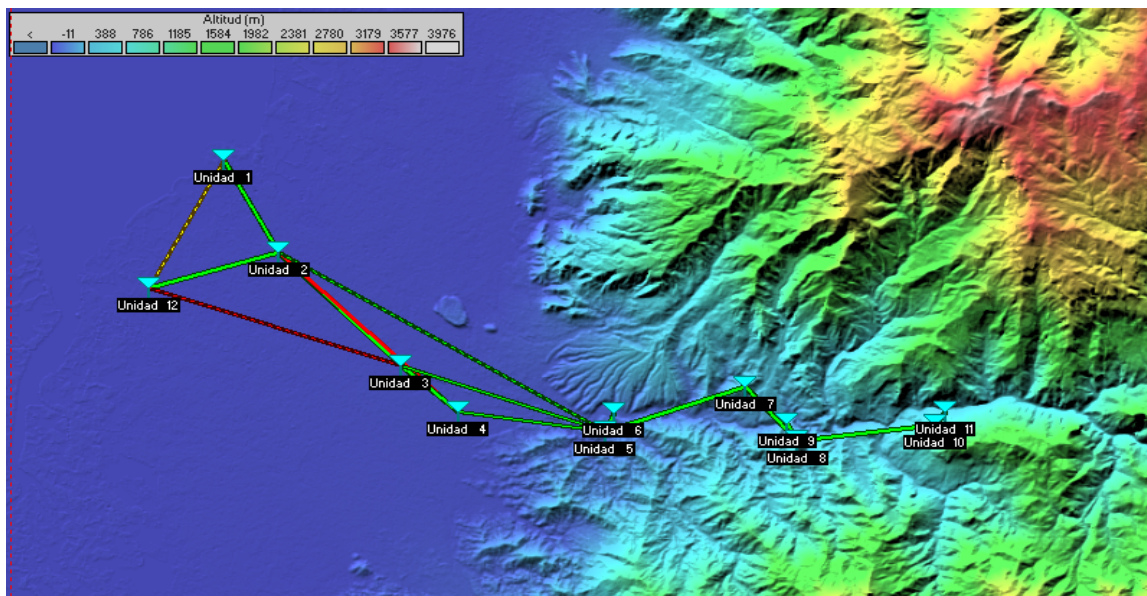


Figura 3. 24Red de transporte y factibilidad de radioenlaces.

Con fines de verificación de los resultados presentados en la Tabla 3.3, escogimos el primer radioenlace y calculemos la potencia de recepción donde la frecuencia es 2.450 GHz, la distancia es 6.66 Km, se tiene:

- La atenuación en el espacio libre $L_{bf}(dB)$:

$$L_{bf}(dB) = 32.45 + 20 \cdot \log[f(MHz)] + 20 \cdot \log[d(Km)] \quad (3.1)$$

Resultados

$$L_{bf}(dB) = 32.45 + 20 \cdot \log[2450] + 20 \cdot \log[6.666]$$

$$L_{bf}(dB) = 116.7527 \text{ dB}$$

La atenuación total del trayecto se debe a la suma de la atenuación en el espacio libre (L_{bf}), atenuación por gases (A_g que es cero ya que la frecuencia es menor a los 10 GHz), atenuación por lluvia (A_r que es menor a 1 dB para la región del Azuay y El Oro), más un margen de desvanecimiento que se puede considerar un valor de 15 dB más 5 dB por otras causas.

La atenuación total será:

$$A_t(dB) = L_{bf} + L_e = 116.7527 + 20 = 136.7527 \text{ dBm}$$

La potencia de recepción será:

$$P_r(dB) = P_t(dB) + G_t(dB) + G_r(dB) - A_t(dB) \quad (3.2)$$

$$P_r(dB) = 20(dB) + 15(dB) + 15(dB) - 136.7527(dB) = -82.7527 \text{ dBm}$$

Este valor es muy cercano al encontrado por el software Radio Mobile.

3.1.7 Cálculo de desvanecimientos

Para la verificación de la calidad de los radioenlaces, es necesario evaluar la probabilidad de que se rebase una determinada profundidad de desvanecimiento F , dB. También es importante calcular la duración media de los desvanecimientos.

La Figura 3.24, muestra que el emplazamiento total de la red de telecomunicaciones cubre una distancia de aproximadamente 50 Km que empieza en la Sierra y termina en la Costa. Esto significa que las condiciones meteorológicas pueden ser muy cambiantes y perjudiciales para los radioenlaces de esta red.

Para el cálculo de la probabilidad de rebasar un desvanecimiento profundo se utilizará la siguiente expresión.

$$P = P_o \cdot 10^{-M/10} \quad (3.3)$$

Donde P_o es un parámetro denominado “factor de aparición de desvanecimiento”, y depende de la longitud del enlace, de la frecuencia, de la rugosidad del terreno y del clima [44]. “M” representa el margen bruto de desvanecimiento y viene dado por:

$$M = P_{rx} - U_{mbral} \quad (3.4)$$

Donde P_{rx} es la potencia de recepción y U_{mbral} es el umbral de recepción del receptor.

Para la obtención de la probabilidad del desvanecimiento, se utilizará el Método de Mojoli, donde el valor de P_o para el mes más desfavorable se expresa como:

Resultados

$$Po = K * Q * F * (d)^3 \textbf{(3.5)}$$

Donde:

Po: valor que depende de la distribución de probabilidad

K: Factor climático.

Q: Factor de rugosidad.

f: Frecuencia en GHz.

d: Distancia en Km.

El factor climático *K* puede tomar los siguientes valores:

CLIMA	VALOR DEL FACTOR CLIMÁTICO (K)
Templado	$4.1 \cdot 10^{-5}$
Continental	$2.1 \cdot 10^{-5}$
Seco y Montañoso	$1 \cdot 10^{-5}$

Tabla 3. 5Valores del factor climático.

El factor de rugosidad *Q* viene definido por:

$$Q = (S)^{-1.3} \textbf{(3.6)}$$

Donde *S* es el coeficiente de la rugosidad del terreno en metros y se define como la desviación estándar de las alturas del perfil topográfico sobre el nivel del mar, de la siguiente manera:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(hi - \bar{h})^2}{n}}, \text{ donde } \bar{h} = \frac{\sum hi}{n} \textbf{(3.7)}$$

Para este cálculo se recomienda tomar muestras cada cierto número de kilómetros, pero se deben excluir los valores extremos.

Se tomará como ejemplo de cálculo el primer radioenlace U1-U2 y empezaremos calculando *Po*.

$$Po = K * Q * F * (d)^3$$

$$Po = (2.1 * 10^{-5}) * S^{-1.3} * (6.66)^3$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum(hi - \bar{h})^2}{n}}$$

$$\bar{h} = \frac{\sum hi}{n} = \frac{2 + 2 + 4 + 4 + 7 + 7 + 7 + 10 + 11}{9} = 6 \text{ m}$$

Resultados

$$S = \sqrt{\frac{84}{9}} = 3.05505046 \text{ m}$$

$$P_o = (2.1 * 10^{-5}) * (3.05505046)^{-1.3} * (6.66)^3$$

$$P_o = 0.00348609$$

Para este vano la potencia de recepción es -81.6 dBm, el umbral de recepción es de -97 dBm, entonces el valor del margen de desvanecimiento M será:

$$M = Prx - Umbral$$

$$M = -81.6 - (-97) = 15.4 \text{ dBm}$$

Con estos valores, se puede calcular la probabilidad de desvanecimiento P de la siguiente manera:

$$P = P_o \cdot 10^{-M/10} = 0.00348609 * 10^{-15.4/10} = 0.00010053779$$

$$P\% = 100 * P = 0.010053779 \%$$

La disponibilidad del sistema $D\%$, será:

$$D\% = 100 - P\% \tag{3.8}$$

$$D\% = 100 \% - 0.010053779 \%$$

$$D\% = 99.989946 \%$$

La indisponibilidad del sistema será calculará como el tiempo fuera de servicio para el peor mes del año como se indica a continuación:

$$tfs = 30 * \frac{P\%}{100} * 24 * 60 \text{ minutos} \tag{3.9}$$

$$tfs = 30 * \frac{0.010053779}{100} * 24 * 60 \text{ minutos}$$

$$tfs = 4.34332 \text{ minutos}$$

Los valores calculados para este primer vano se registran en la Tabla 3.6. De la misma manera los cálculos de los otros vanos se registran en la misma tabla.

Radioenlace	d (Km)	S (m)	Prx(dBm)	Probabilidad de desvanecimiento (%)	Disponibilidad (%)	Tiempo probable de desvanecimiento plano durante el mes más desfavorable (min)
U1 - U2	6,66	3,05500	-81,6	0,0100537790	99,989946220	4,343232381
U2 - U12	7,82	2,95690	-83,8	0,0281803120	99,971819690	12,173894640
U2 - U3	10,11	2,62460	-86,3	0,1264407420	99,873554920	54,624275290
U3 - U4	4,41	1,82570	-79,4	0,0034345920	99,996565410	1,483743627
U4 - U5	8,56	30,60898	-87,5	0,0041519130	99,995848090	1,793626625
U5 - U6	1,23	11,89771	-69,2	0,000006223	99,999999380	0,000268861
U5 - U7	8,58	96,98890	-86	0,0006609270	99,999339070	0,285520489
U7 - U8	4,52	52,21030	-81,3	0,0000732420	99,999926760	0,031640724
U8 - U9	1,19	61,41813	-70,3	0,000068279	99,999999320	0,000294964
U8 - U10	8,13	184,49383	-86,1	0,0002494170	99,999750580	0,107748077
U10 - U11	1,06	160,44210	-71,4	0,000000225	99,999999980	0,000009703

Tabla 3. 6 Cálculos de probabilidad de desvanecimientos por multitrayecto.

Se puede observar en la Tabla 3.6 que la probabilidad más alta corresponde al trayecto U2-U3 debido a que dispone del recorrido mayor. El tiempo probable de actividad de multitrayecto es de 54.6242 minutos con una probabilidad de ocurrencia de 0,1264 %, lo cual es muy bajo. Se debe observar que mientras menos rugoso es el terreno, la probabilidad de aparición del multitrayecto aumenta y por lo tanto el tiempo fuera de servicio estimado.

3.1.8 Cálculo de indisponibilidad de los equipos

Los equipos necesarios para el funcionamiento de la red de monitoreo se hallan compuestos por las sondas WTW, controladores de datos WTW, módulos de energía, acondicionadores de señales, Sensores Inalámbricos WSN Crossbow, Transceptor de RF y antenas.

Considerando un Tiempo Medio entre Fallas (MTBF) de 35000 horas y un Tiempo Promedio entre Reparaciones (MTTR) de 5 horas, la indisponibilidad de un solo equipo ya sea WTW o Crossbow, será:

$$U\% = \frac{MTTR}{MTBF+MTTR} * 100 \quad (3.10)$$

Debido a que $MTBF \gg MTTR$, se aproxima a:

$$U\% = \frac{MTTR}{MTBF} * 100 = q \quad (3.11)$$

$$U\% = \frac{5}{35000 + 5} * 100 = q = 0.014283\%$$

La indisponibilidad de equipos conectados en serie se calculará de la siguiente manera:

$$(MTBF)_T^{-1} = (MTBF)_1^{-1} + (MTBF)_2^{-1} + \dots (MTBF)_n^{-1} \quad (3.12)$$

Para el caso de una sola mota, los equipos que se hallan en serie serán:

- ✓ Sensor de Nitratos.
- ✓ Sensor de pH.
- ✓ Sensor de Oxígeno Disuelto.
- ✓ Controlador de datos WTW.
- ✓ Fuentes de poder WTW.
- ✓ Acondicionador de señales.
- ✓ Tarjeta MDA300CA.
- ✓ Tarjeta MPR2400.
- ✓ Amplificador de RF.
- ✓ Antena Omnidireccional.

Por lo tanto se trata de 10 subsistemas colocados en serie.

Si consideramos que el MTBF y MTTR promedio de todos los equipos es de 35000 horas y 5 horas respectivamente, el MTBF total se hallará de la siguiente manera:

$$(MTBF)_T^{-1} = 10 * (MTBF)_1^{-1} = 10 * \left(\frac{1}{35000}\right) = 10/35000$$

$$MTBF_T = 3500 \text{ horas}$$

Como era de esperarse, el tiempo promedio entre fallas ha disminuido ya que existen varios subsistemas que vuelven más vulnerable a la totalidad de la mota.

Considerando la red de la Figura 3.25 la cual dispone de 11 vanos, un canal disponible por vano y cero enlaces redundantes, se calcula la indisponibilidad total del sistema de la siguiente manera:

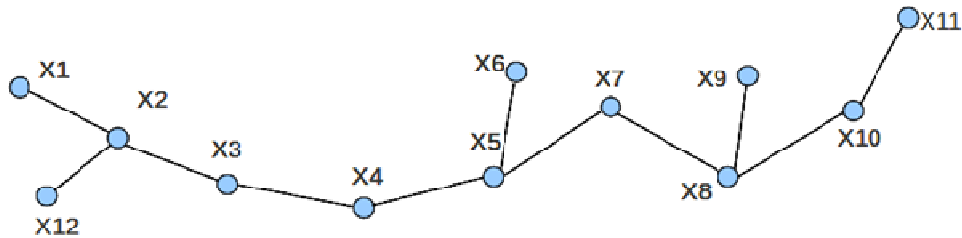


Figura 3. 25 Red de monitoreo con sensores y sondas.

$$U\% = \frac{200}{M} * \left(\frac{M+N}{N+1}\right) * (m * q)^{N+1} \quad (3.13)$$

Donde,

M = número de canales disponibles

N = número de canales de reserva

m = número de vanos

Para este caso tendremos, $M = 1$, $N = 0$, $m = 11$, $q = 0.014283 * 10^{-2}$.

$$U\% = \frac{200}{1} * \left(\frac{1+0}{0+1}\right) * (11 * 0.014283 * 10^{-2})^{0+1} = 4.9387 * 10^{-4} = 0.04938\%$$

Esto representa un valor aceptable para el sistema propuesto.

3.2 Frecuencia de actualización de las medidas

Recordemos que existen dos métodos de análisis de la calidad del agua, estos son: análisis de campo y de laboratorio. El segundo método conlleva a resultados más

precisos acerca de la calidad del agua, sin embargo existen problemas inherentes al método como por ejemplo, el tiempo que transcurre desde que la muestra es tomada en el campo hasta su llegada al laboratorio en el que pueden producirse cambios físico – químicos y bioquímicos dentro del envase de muestreo, lo que producirá un cambio en la calidad intrínseca de la muestra de agua.

El método propuesto en este trabajo corresponde a la medida en línea de variables físicas en el agua de río mediante sondas para nitratos, oxígeno disuelto y PH; y mediciones ambientales de temperatura, humedad relativa y luz del área en donde se encuentra la estación de monitoreo. Este método tiene la ventaja de no transportar muestras ya que las sondas y sensores realizan medidas en línea y en tiempo real.

Respecto de la frecuencia de actualización de las medidas, dependerá del método seguido para dichas mediciones y de las regulaciones y reglamentaciones de cada país.

Por ejemplo en la Figura 3.26 se muestra un plan de monitoreo de calidad del agua donde se indica la metodología y la frecuencia de monitoreo de acuerdo a lo acordado por los países de la Comunidad Andina (CAN), Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia.

**PLAN DE MONITOREO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SEDIMENTOS
(Ríos, lagos, lagunas, embalses, aguas costeras)**

Indicadores	Metodología Analítica	Frecuencia de monitoreo(1)
p H	APHA-AWWA-WPCF (parte 4500 H)	Mensual/Trimestral
Demanda Bioq. del oxígeno(DBO5)	APHA-AWWA-WPCF (parte 5210 B)	Mensual
Sólidos suspendidos	APHA-AWWA-WPCF (parte 2540 D)	Mensual
Oxígeno disuelto	APHA-AWWA-WPCF (parte 4500 O G)	Mensual
Coliformes totales	APHA-AWWA-WPCF (parte 9222 B)	Mensual
Fósforo total	Colorimétrico – Vanadomolybdophosphorico ácido APHA-AWWA-WPCF (parte 4500-P C)	Mensual
Nitrógeno total	NO3+NO2+NH3+N	Mensual
Nitritos	APHA-AWWA-WPCF (parte 4500 NO2 B)	Mensual
Amoniaco	APHA-AWWA-WPCF (parte 4500 NH3 B/F)	Mensual
Nitrógeno Kjeldahl	APHA-AWWA-WPCF (parte 4500 Norg B)	Mensual

APHA-AWWA-WPCF: Organizaciones que establecen los métodos estándar para análisis de aguas de consumo y residuales en EUA.
(1) Se completará una frecuencia mensual/trimestral por 1 año, de acuerdo a la capacidad analítica de cada país y luego, de acuerdo a la información obtenida, se confeccionará un nuevo cronograma de frecuencia para cada país.

Tabla 3. 7Plan de Monitoreo de aguas superficiales y sedimentos propuesto por la CAN[45].

Las frecuencias de monitoreo de las variables anotadas en la Tabla 3.7 podrían parecer muy grandes, pero se entiende que es una recomendación a seguir, sin embargo dada la naturaleza de cada zona geográfica y de cada río en particular, estos tiempos pueden cambiar de acuerdo a las necesidades de cada entidad de control ambiental.

La naturaleza estadística de las mediciones, la representatividad de las mismas, la recolección de datos, el manejo de resultados y las operaciones de control sobre la calidad del agua pueden resultar muy complejas a la hora de elegir ciclos de trabajo del sistema de monitoreo. Esto significa que la frecuencia de las mediciones podrían ser desde el orden de los *minutos, horas y días*.

Analizando el *objetivo principal* de la medición de las variables anotadas en la Tabla 3.8, aprovechando las ventajas de las sondas de medición que no requieren reactivos y tomando en cuenta la disposición de los equipos de telecomunicaciones, se asume una frecuencia de medición que se anota en la misma Tabla 3.8.

Variable	Frecuencia de medición	Objetivo de la medición
Nitratos	diaria	Control de calidad del agua por lixiviación de nitratos hacia aguas subterráneas, Monitoreo y control de pesticidas, saneamiento ambiental.
Oxígeno disuelto	diaria	Control de supervivencia de organismos acuáticos. Control de olor, claridad del agua y sabor.
Nivel de PH	diaria	Control de desechos industriales, control de agua de regadío agrícola, control de producción y seguridad alimenticia, control de drenaje ácido por explotaciones mineras, etc.
Temperatura ambiental	cada hora	<i>calentamiento global</i> : posible reducción de agua potable, más incendios, mayores inundaciones, alteraciones del ecosistema, incapacidad de la vegetación para absorber CO2 de la atmósfera, impacto estacional en la vida humana y animal, etc.
Humedad Relativa	cada hora	Estudio de las variaciones ambientales en la salud humana y animal.
Luz	cada hora	Estudio del impacto de la luz solar en el clima.

Tabla 3. 8 Frecuencia de actualización de las medidas.

Las variables ambientales tienen la característica de variar lentamente, esto significa que pueden existir cambios respecto de su valor medio en intervalos de tiempo que pueden ser horas o días. Pero para los sensores y sondas utilizados en este trabajo, dichas variaciones no serían problema ya que constantemente están percibiendo cambios y transmitiéndolos a través de la red de telecomunicaciones al sumidero central.

3.3 Precisión espacial de las medidas

Primeramente es importante analizar el tipo de información generada a través de la red de monitoreo ambiental. Se trata justamente de *información geográfica* ya que posee datos espaciales georeferenciados por coordenadas fijas de cada estación de monitoreo y estaciones de repetición. En los datos transportados se encuentra información alfanumérica asociada.

En la Figura 3.5 se puede observar que las estaciones U1, U2, U3, U4, U6, U9 y U11 contienen todas las sondas y grupo de sensores inalámbricos cuyas posiciones son fijas.

La información generada y almacenada en el sumidero final U12 puede disponer de un sistema de información geográfica SIG, el cual daría más importancia a las propiedades del espacio más que a la precisión de la localización.

3.4 Sistema de alimentación de los sensores y sondas

En términos generales, el consumo eléctrico de la red de monitoreo se puede dividir en: consumo eléctrico de las estaciones de monitoreo, consumo eléctrico de las repetidoras y consumo eléctrico de cada mota.

Hay que recordar que cada mota dispone de sus propias baterías, sin embargo se tomará en cuenta su potencia para el diseño del sistema fotovoltaico. Entonces el cuadro de consumo eléctrico se resume a lo indicado en la Tabla 3.9.

ITEM	COMPONENTES	CONSUMO (W)
1	Estaciones U1, U2, U3, U4, U6, U9, U11	
	Equipos WTW	11
	Computador portátil	50
	Router WiFi	11
	Amplificador RF 2.4GHZ	11
	CONSUMO INDIVIDUAL POR ESTACION	83
2	Repetidoras	
	Amplificador RF 2.4GHZ	11
	Repetidor WiFi	11
	CONSUMO INDIVIDUAL POR REPETIDORA	22
3	16 motas por cada estación de monitoreo	2,88
	(cada mota consume aproximadamente 0,180 W)	

Tabla 3. 9Consumo eléctrico individual de las estaciones de monitoreo, de las repetidoras y el conjunto de 16 WSN.

El sistema de alimentación eléctrico principal para las repetidoras, estaciones de monitoreo y nodo central, se tomará de la red eléctrica de alumbrado público. Sin embargo cuentan con sistemas fotovoltaicos para asegurar el funcionamiento en caso de falla del sistema principal.

3.4.1 Tolerancia a fallas

La tolerancia a fallas se puede dividir en algunos aspectos: búsqueda de enlaces redundantes y sistemas alternativos de provisión de energía eléctrica.

- El primer aspecto de enlaces redundantes ya fue analizado en puntos anteriores, concluyendo que la única estación que podría tener una alternativa de camino

redundante sería de U2 a U5 sin requerir de la estación U3 y U4 con una potencia de recepción de -92dBm.

- El sistema alternativo de energía eléctrica fotovoltaico, se representa a través de la Figura 3.26:

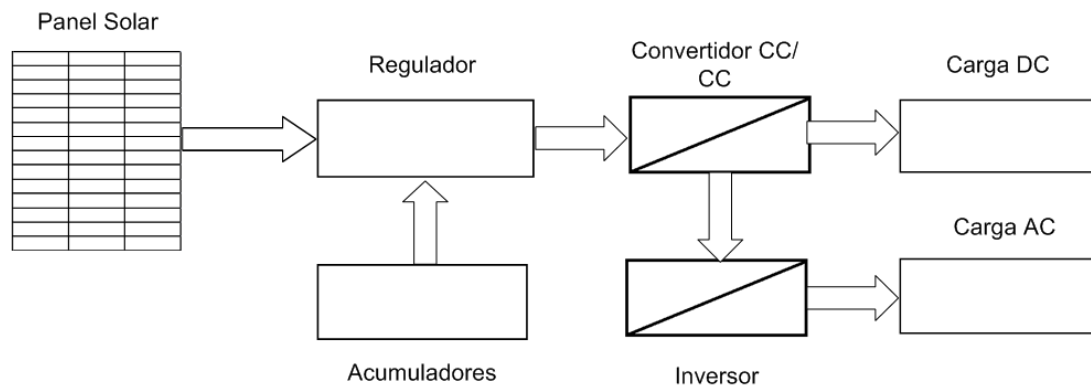


Figura 3. 26 Esquema general del sistema fotovoltaico.

La Figura 3.26 muestra los componentes básicos de un sistema fotovoltaico a utilizarse en este proyecto.

El procedimiento a seguir en el diseño es el siguiente:

1.- *Irradiancia solar en Ecuador:* Para el diseño de este sistema fotovoltaico es necesario el valor de la Irradiancia solar en el Ecuador para el peor mes del año. Esto es de 3.691 Kwh/m² día, para el mes de Junio, y un valor de 5.132 Kwh/m² día, para el mes de Enero [46].

2.- *Cálculo de la energía eléctrica requerida:* este valor depende de la naturaleza y cantidad de cargas a instalarse en cada subsistema. Con los valores de consumo en CC y CA de los equipos y considerando un factor de seguridad del 15% y una eficiencia del inversor de tensión del 85%, se obtiene el detalle de consumo eléctrico por cada unidad de monitoreo U1, U2, U3, U4, U6, U9 y U11. Considerando un valor de voltaje máximo del panel igual a 26.3 V, se calcula también la corriente máxima por hora. En la Tabla 3.10 se muestra el detalle de las cargas a instalarse en el sistema fotovoltaico.

Item	Tipo de Carga	Nro. Unidades N	Potencia (W) P	Corriente (A)	Tiempo de funcionamiento (horas)	Energía E=N*P*th [w.h/día]
1	Sistema de Sondas WTW	1	15	1,2401	8	120
2	Computador personal	1	41	3,3823	8	328
3	Router	1	15	1,2401	8	120
4	Amplificador RF	1	15	1,2401	8	120
5	Luminarias AC	1	25	2,0833	8	200
6	Baliza	1	25	2,0833	8	200
TOTAL		6	136	11,2692	48	1088

Tabla 3. 10 Cuadro de consumo eléctrico de las unidades de monitoreo.

3.- Cálculo para el mes más desfavorable: para esto se calcula el cociente entre la energía eléctrica de consumo E_{elc} y la Irradiancia promedio H_s .

$$Y_{max} = \frac{E_{elc} [W \cdot \frac{h}{día}]}{H_s [(W \cdot \frac{h}{día})/m^2]} \quad (3.14)$$

Donde Y_{max} es el cociente de energía de consumo.

$$Y_{max} = \frac{1088}{3691} = 0.29477 m^2$$

4.- Elección del número y tipo de paneles solares: se escogerá un panel solar cuyas características se indican a continuación:

Electrical Specifications	
MODEL	KC200GT
Maximum Power	200 Watts
Tolerance	10% / -5%
Maximum Power Voltage	23,6 Volts
Open Circuit Voltage	32,9 Volts
Short Circuit Current	8,21 Amp
Length	1425 mm (56,2 in)
Width	990 mm (39,0 in)
Depth	36 mm (1.4 in)
Weight	18,5 kg (40,t lbs)
Thermal parameters	
Nominal Operating Cell Temperature	47 deg
Isc Current temperature coefficient	(3.18×10^{-3}) A/deg
Voc Voltage temperature coefficient	$(-1,23 \times 10^{-1})$ V/deg

Tabla 3. 11 Especificaciones eléctricas del panel solar [47].

El número de módulos fotovoltaicos se calcula de la siguiente manera:

$$N_{mod} = 1.1 * \frac{Y_{max}}{Pot[Kw]} \quad (3.15)$$

Donde Pot : Potencia nominal del panel solar

$$N_{mod} = 1.1 * \frac{0.29477}{0.200} = 1.6212 \text{ paneles}$$

El coeficiente de 1.1 es un valor de seguridad aplicado al diseño. Como se puede observar en el cálculo anterior, el número total de paneles sería entonces:

Resultados

$N_{mod} = 2$ paneles solares

5.- *Sistema de baterías:* se deben considerar los siguientes parámetros:

Pd,max : profundidad máxima de descarga de batería, 0.6 a 0.8

$Pd,diaria$: profundidad máxima de descarga diaria, 0.2

VT,bat : voltaje de trabajo de baterías, 12 V

$tiempo,auto$: tiempo de autonomía, entre 6 y 10 días

Para el presente diseño se escogen los siguientes parámetros:

$Pd,max = 0.7$

$Pd,diaria = 0.2$

$VT,bat = 12$ V

$tiempo,auto = 3$ días

Por lo tanto la capacidad de corriente del sistema de baterías ($C_{bat,total}$ [A.h]) se halla de la siguiente forma:

$$C_{bat,total} = 1.1 * \frac{tiempo,auto * E_{elec,max}}{Pd,max * VT,bat} \quad (3.16)$$

$$C_{bat,total} = 1.1 * \frac{3 * 1088}{0.7 * 12} = 427.4285 \text{ [A.h]}$$

El número de baterías se calcula entonces:

$$No,bat = \frac{C_{bat,total}}{C_{bat,unitaria}} \quad (3.17)$$

Donde $C_{bat,unitaria}$ es la capacidad de corriente que provee una sola batería. Para este proyecto se escoge una batería de 110 A.h. Por lo tanto, el número de baterías será igual a:

$$No,bat = \frac{427.4285 \text{ A.h}}{110 \text{ A.h}} = 3.8857 \cong 4 \text{ baterías}$$

6.- *Especificaciones del sistema de regulación:* se deben dimensionar los fusibles térmicos básicamente bajo la consideración de un aumento del 25% por cuestiones de seguridad. En la Figura 3.27 se muestra la manera de conexión de cables de los paneles solares y sistema de baterías al regulador de carga.

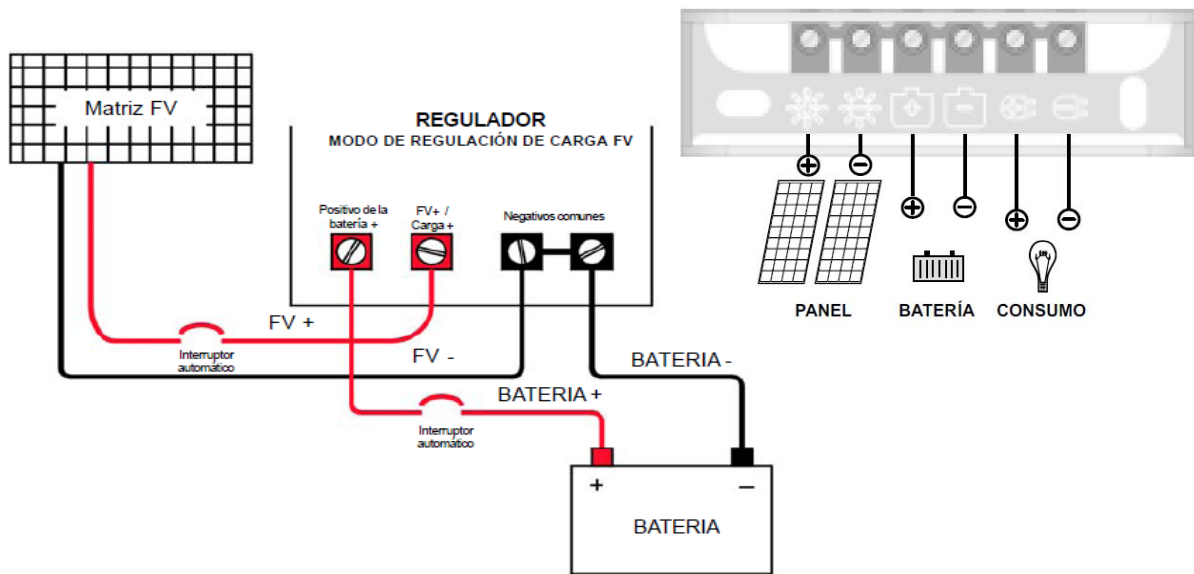


Figura 3. 27 Diagrama del cableado de la regulación de carga FV.

Los Interruptores automáticos del panel solar y del sistema de baterías deben cumplir con las especificaciones de corriente, esto es:

$$I_{max, interruptores} = 1.25 * 11.2692 A = 14.0865 A$$

Se puede escoger el Regulador Xantrex modelo C35 [48] que puede manejar una corriente de carga máxima en DC de 35 amperios. Esto brinda un nivel de seguridad al diseño.

7.- *Dimensionado del Inversor*: los inversores se dimensionan considerando dos tipos de potencia:

- ✓ P_{inv} : potencia en servicio continuo que es igual a la suma de las potencias de todas las cargas que pueden trabajar simultáneamente. A este valor es recomendable sumarle un 25%.
- ✓ $P_{p,inv}$: potencia pico del inversor en caso de proveer potencias pico hacia las cargas.

Para este proyecto no se requieren potencias picos para su funcionamiento, por lo tanto se considerará solamente la potencia total multiplicada por el 1.25%. Esto es: $136 * 1.25 = 170W$. El Inversor entonces deberá manejar una potencia de al menos 170W.

3.5 Resultados de la Simulación en NS2

La simulación de la red de sensores inalámbricos responde a una topología y especificaciones técnicas de los WSN cuya justificación se muestra a continuación.

El problema de la contaminación de las aguas de los ríos de las zonas agrícolas por uso de pesticidas se puede dividir en varios subproblemas como por ejemplo:

- ✓ Estimación de la concentración de Nitrógeno, nitrato, pH en los suelos de cultivo antes de la siembra a distintas profundidades del suelo y a distintas épocas del año.
- ✓ Mediciones de variables climáticas como radiación solar, temperaturas mínima y máxima, lluvia y evapotranspiración. Estudio de las características del suelo antes, durante y luego de las cosechas de las siguientes variables Nitrógeno, Nitratos, pH, profundidad de los horizontes.
- ✓ Estudio de las características del Sistema de Cultivo como por ejemplo densidad y profundidad de las semillas, tipos de regadíos, tipo de fertilizantes.
- ✓ Otras variables a considerar en un sistema agrario son: producción agrícola, cantidad y calidad de los productos, impacto al medio ambiente, evaluación de las características del suelo por efecto del cultivo.

Al existir muchas variables involucradas en la problemática agraria, se puede mencionar que existen algunos modelos de simulación que correlacionan las variables anteriores.

Los modelos de enfoque analítico como STICS, CROPSYST o GLEAM dividen el suelo en capas que se caracterizan por su volumen de agua máximo almacenable y su concentración de soluto [49]. El flujo de agua y el transporte de los solutos, homogéneamente mezclados con el agua, se realiza de una capa a la siguiente (más profunda) cuando se supera el contenido de agua almacenable en esta capa. Este tipo de modelos reciben, también, el nombre de modelos de cascada o capacitivos. El modelo STICS calcula día a día el valor de variables agronómicas (índice de área foliar, biomasa, rendimiento y consumo de agua y nitrógeno) junto con variables ambientales (contenido de agua del suelo, contenido de nitrógeno del suelo, drenaje y lixiviación de nitrógeno en la base del perfil del suelo). Se requieren para su ejecución los datos relativos al tipo de cultivo y prácticas culturales, características del suelo y de nitrógeno iniciales [49]. Además se requieren datos iniciales de calibración de alguna variedad particular.

Existen otro tipo de modelos con enfoque analítico como HYDRUS que soluciona el flujo de agua y el transporte de solutos mediante la resolución numérica de la ecuación de Richards y la ecuación de convección – dispersión respectivamente [49]. Algunos autores concluyen que STICS es apto para la simulación del transporte de nitratos en un medio de infiltración unidimensional (riego por aspersión). Para el caso de un medio de infiltración bidimensional (caso de riego por surcos), estos autores proponen la utilización del modelo bidimensional HYDRUS-2D. Este modelo permite simular el movimiento del agua, calor y solutos en un medio unidimensional bajo diferentes regímenes de saturación del suelo. Incorpora un término para contabilizar las extracciones de agua por parte de las raíces del cultivo. Las condiciones de contorno para el flujo de agua permiten entradas (precipitaciones) y salidas (evaporación) en la superficie, mientras que, en profundidad a 1,4m existe drenaje libre hacia capas más

Resultados

profundas. Así mismo las condiciones iniciales de este modelo se definen con el contenido de agua y de nitratos en el perfil del suelo para una fecha determinada de inicio del proceso [49].

En la Figura 3.28 se muestra parte del programa *HYDRUS 2.01.0980 Demo* [50].

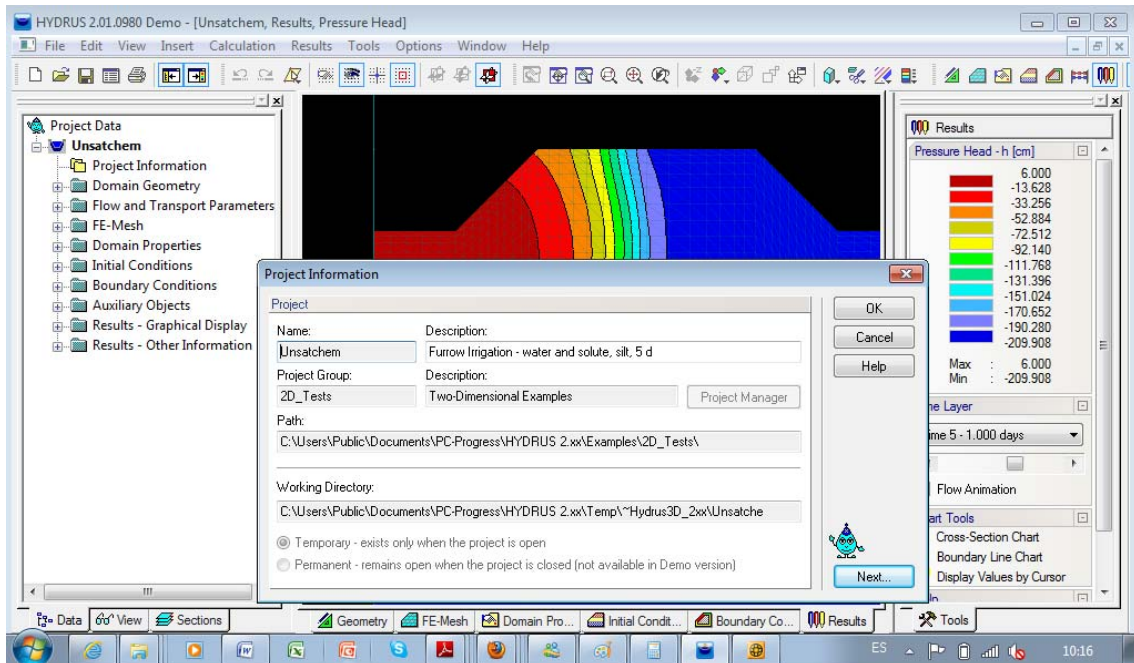


Figura 3. 28 Programa de simulación *HYDRUS 2.01.0980 Demo*, ejecutando “Furrow Irrigation - water and solute, silt, 5 d” [50].

La Figura 3.28 muestra el software *HYDRUS 2.01.0980 Demo* (se puede descargar de <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?h3d-downloads>), contiene pestañas que permiten manipular procesos como Domain Geometry, Flow and Transport Parameters, FE-Mesh, Domain Properties, Initial Conditions, Boundary Conditions, Auxiliary Objects, Results – Graphical Display, Results – Other Information.

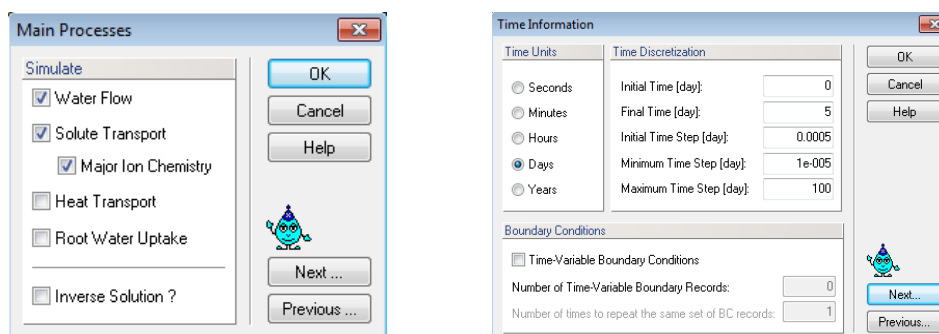


Figura 3. 29 Ventanas de configuración del modelo de simulación [50].

Resultados

La Figura 3.29 muestra ventanas para cambios en la configuración de la simulación como por ejemplo en el tipo de flujo de agua o de solventes, además el tiempo de simulación en segundos, minutos, horas, días y años.

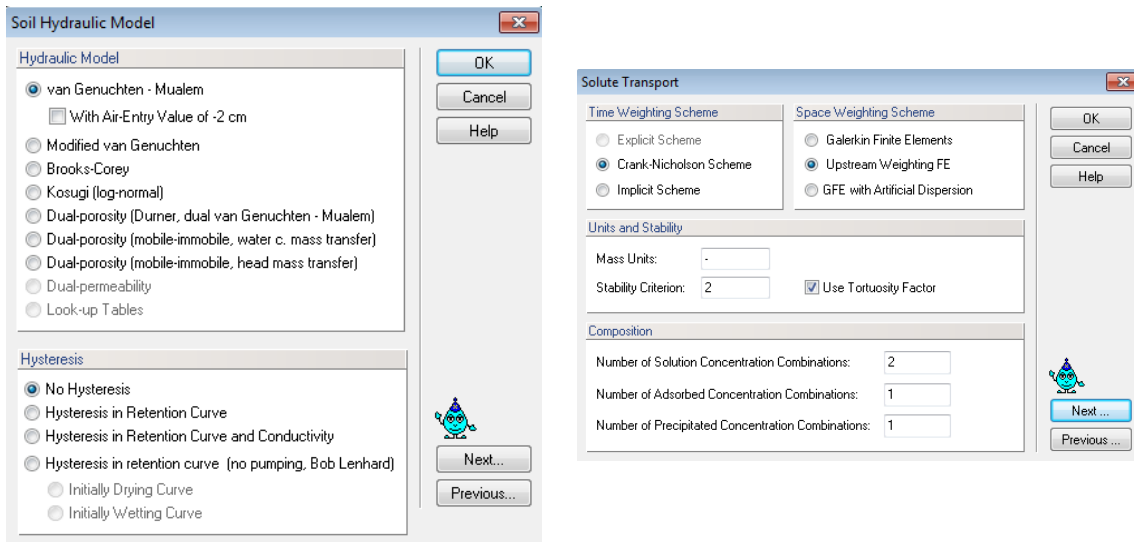


Figura 3. 30 Ventanas de configuración del modelo de simulación [50].

La Figura 3.30 muestra el modelo hidráulico a seguir y el modelo de transporte de los solventes.

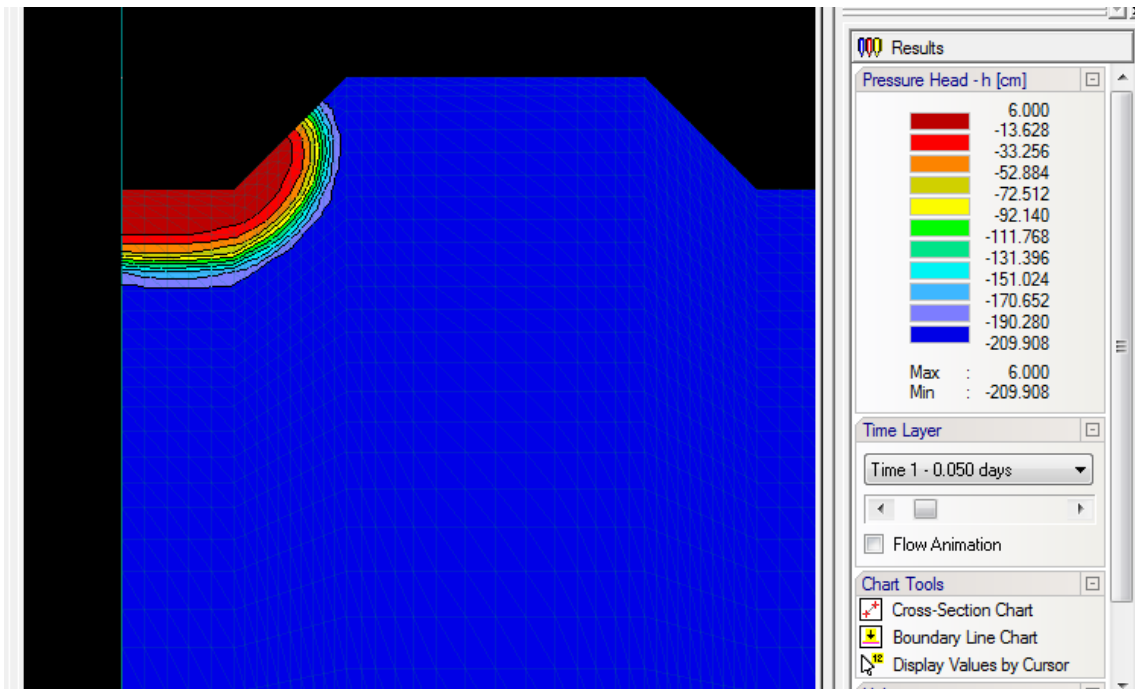


Figura 3. 31 Cambios de presión del agua en el surco luego de 0.050 días [50].

La Figura 3.31 muestra uno de los resultados de la simulación, se trata de los cambios de presión en cuanto fluye el agua por el surco de una zona agrícola en particular.

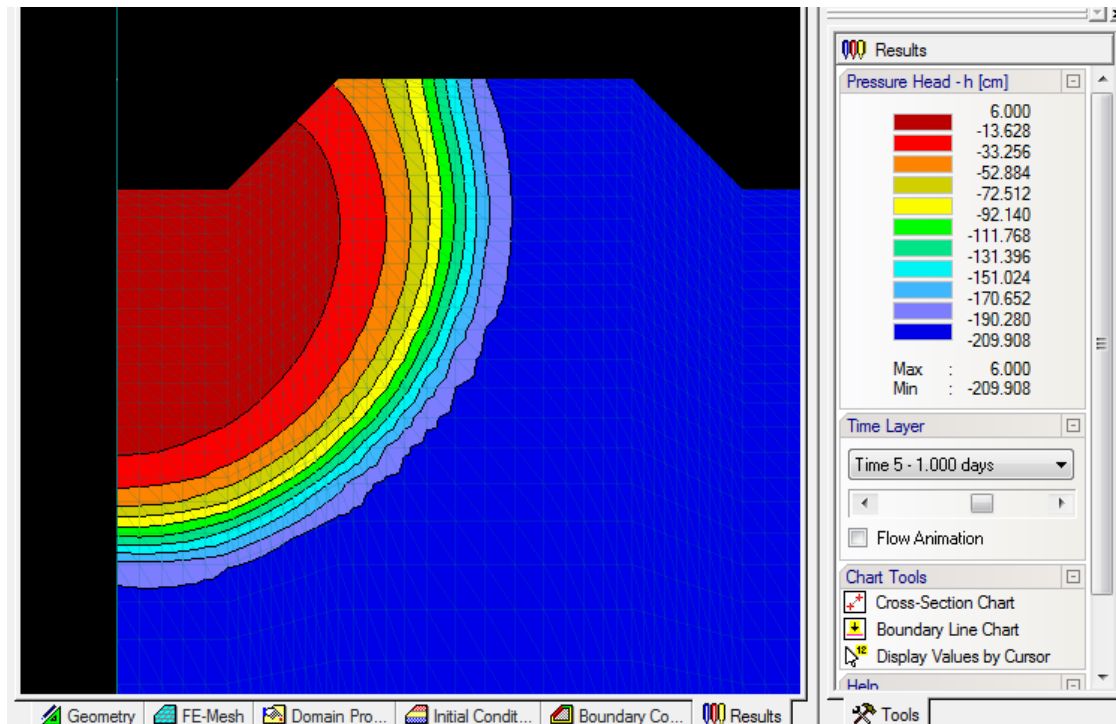


Figura 3. 32 Cambios de presión del agua en el surco luego de 1 día [50].

La Figura 3.32 muestra los cambios de presión producidos por efecto de la irrigación del surco luego de un día de simulación. Como se puede observar existe una propagación de la presión del agua en el surco.

3.5.1 Topología de la red de sensores inalámbricos

Los modelos de simulación analizados en el punto anterior manejan muchas variables propias del sistema agrario. El presente trabajo no pretende analizar la validez de los modelos de simulación, más bien demostrar que el proceso de lixiviación de solutos como los nitratos y otros elementos, es muy complejo. Se trata más bien de proponer una topología de sondas en el agua para verificar la calidad de las aguas de río. Por otro lado, proponer una topología de sensores en el suelo (muy cercano a las orillas del río) orientados a determinar variables como humedad relativa del aire y del suelo básicamente, temperatura ambiental ya que esto cambia la evapotranspiración, y la luz solar.

Se busca correlacionar las variaciones de Nitratos, pH y Oxígeno Disuelto en el agua del río Jubones, con la lixiviación de pesticidas desde los suelos de cultivo de banano. Correlacionar además dichas variaciones en espacio y tiempo con los procesos de fumigaciones aéreas para todos los meses del año, con la pluviosidad (ya que también los contaminantes son arrastrados por las lluvias a los ríos), con las variaciones de

temperatura ambiental (ya que cambia la evapotranspiración del suelo especialmente a nivel superficial).

Los modelos de simulación más utilizados STICS e HYDRUS-1D-2D que estudian los fenómenos físico – químicos que se producen en el campo agrícola, no sugieren en su metodología ningún mecanismo específico relacionado con los puntos de muestro del suelo de cultivo. El modelo HYDRUS considera en sus parámetros originales la opción de “Geometría dominante”, que se utiliza para dibujar en 1D, 2D o 3D el relieve del terreno.

Para el caso de colocación de las sondas de medida de humedad relativa del suelo y así estimar el proceso de lixiviación de pesticidas por las aguas subterráneas a los ríos, estas sondas deben colocarse entonces, siguiendo el declive del terreno de cultivo hasta su desembocadura en los ríos. Pueden colocarse también en otras zonas de interés. Otro aspecto importante es el área de cobertura utilizada por el conjunto de sondas de monitoreo de humedad relativa del suelo. Esta área a cubrir dependerá de la accesibilidad a las zonas de medida, la seguridad respecto del ataque de animales, etc.

Se escogerá entonces una topología regular de WSN como la que se indica en la Figura 3.33. Se utilizarán 16 WSN por cada estación de monitoreo de los cuales el nodo 0 se utiliza como sumidero y el nodo 4 como el nodo que recolecta las características físico - químicas del agua del río como son los Nitratos, pH y Oxígeno Disuelto. El resto de los nodos (1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15) disponen de sensores de humedad relativa, temperatura ambiental y Luz solar.

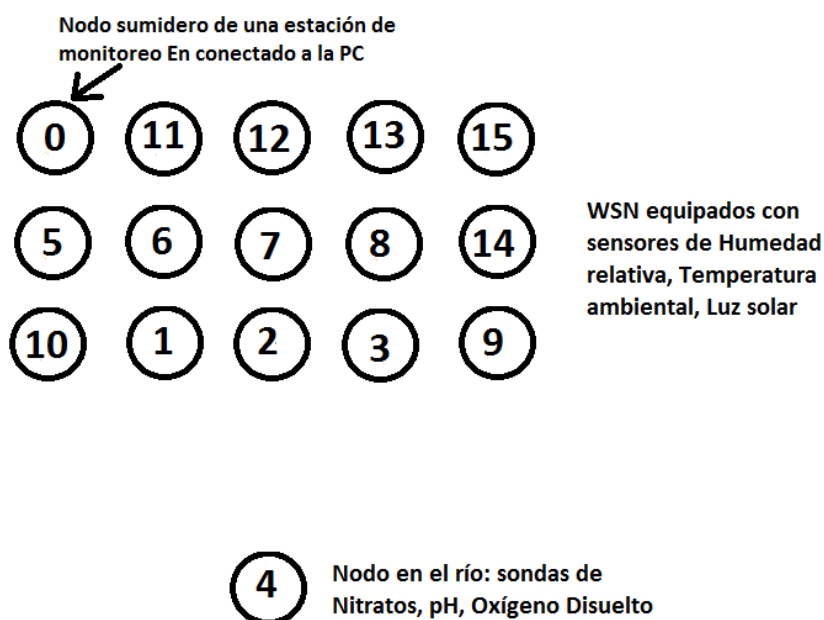


Figura 3. 33 Topología de WSN con separación de 10m entre nodos, ocupando un área de 800 metros cuadrados. Esto corresponde a una estación de monitoreo de las siete en total de la red.

Al disponer la red un total de siete estaciones de monitoreo, existirán 112 ($16 \times 7 = 112$) WSN a lo largo de los 50 Km del río Jubones.

Se ha escogido el protocolo de enrutamiento AODV el que se utiliza en la pila de protocolos de ZigBee [23]. Este protocolo es una elección obvia ya que opera bajo demanda, lo cual se ajusta a la aplicación física de monitoreo de variables ambientales. Estas variables no cambian rápidamente, más bien sus cambios son transmitidos en intervalos de 60 minutos y por cada día. Realmente al tener estáticos a los nodos, ayuda a mantener las tablas de ruteo sin cambios.

Se ha escogido los agentes UDP y TCP. Bajo UDP se utiliza el tipo de tráfico CBR (Constant Bit Rate) ya que permite simular una categoría de servicio de datos donde el tráfico tiene una consistencia de velocidad, donde hay una confianza intrínseca entre el tiempo de sincronización entre la fuente y el destino. El tráfico insertado es de 1 Mbps con un tamaño de paquetes de 1000 bytes y empieza a 0.1 segundos del inicio de la simulación. Bajo TCP se utiliza FTP y empieza a 0 segundos del inicio de la simulación. El tiempo total de la simulación es de 120 segundos.

Se utilizó la aplicación TraceGraph 2.02 para Linux, la cual permite visualizar gráficamente los resultados de la simulación contenidos en el archivo de trazas (*.tr).

A continuación se describe algunos pasos para la conformación del programa de simulación *ina5.tcl*. Primeramente se simula con el Modelo de Propagación de los Dos Rayos, y luego con el modelo de Propagación Shadowing para luego realizar comparaciones.

1.- Configuración del entorno y de los nodos.

3.5.2 Simulación con el modelo de propagación: TwoRayGround

```
set val(chan)Channel/WirelessChannel ;#Tipo de canal
set val(prop) Propagation/TwoRayGround ;#Modelo de propagación
TwoRayGround
#set val(prop) Propagation/Shadowing ;#Modelo Shadowing
set val(netif) Phy/WirelessPhy/802_15_4 ;#Tipo de interfaz de red
set val(mac) Mac/802_15_4 ;#Capa Mac
set val(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;#tipo de cola
set val(ll) LL ;#Tipo de capa LL
set val(ant) Antenna/OmniAntenna ;#Tipo de antena
set val(ifqlen) 150 ;#Máximo de paquetes en cola
set val(nn) 16 ;#número de nodos
set val(rp) AODV ;#Protocolo de enrutamiento
set val(x) 100 ;#dimension x de la topologia
set val(y) 100 ;#dimension y de la topologia
```

2.- Creación del despachador de tareas.

```
#Creación del planificador o despachador de tareas
```

Resultados

```
set ns [new Simulator] ;#set es un comando de asignacion
```

3.- Creación del archivo de salida de trazas y del archivo nam.

```
set tracefile [open ina5.tr w] ;#abrir archivo de traza ina5.tr
$ns trace-all $tracefile
#Creación del archivo de visualización gráfica
set namtrace [open ina5.nam w] ;#abrir archivo de visualización
ina5.nam
$ns namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
```

4.- Establecer la topología.

```
#Establecimiento de la topología
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
```

5.- Creación del archivo GOD.

```
#Definición del archivo GOD: General Operations Director
set god_ [create-god $val(mn)]
set chan_1_ [new $val(chan)]
$ns use-newtrace
```

6.- Establecimiento de la configuración en base a variables anteriores.

```
#Establecimiento de la configuración de los nodos en base a las
variables anteriores
$ns node-config -propType
$ns node-config -adhocRouting $val(rp) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace ON \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF \
    -channel $chan_1_
```

7.- Creación de los nodos.

```
#Creación de los nodos
for {set i 0} {$i < $val(mn)} {incr i} {
    set node($i) [$ns node]
    $node($i) random-motion 1 ;#deshabilitar random-
motion
}
```

8.- Establecimiento de la posición de los nodos.

Resultados

#Establecimiento de la posición de los nodos

```
$node(0) set X_ 10.0
$node(0) set Y_ 40.0
$node(0) set Z_ 0
$node(1) set X_ 20.0
$node(1) set Y_ 20.0
$node(1) set Z_ 0
$node(2) set X_ 30.0
$node(2) set Y_ 20.0
$node(2) set Z_ 0
$node(3) set X_ 40.0
$node(3) set Y_ 20.0
$node(3) set Z_ 0
$node(4) set X_ 30.0
$node(4) set Y_ 0.0
$node(4) set Z_ 0
$node(5) set X_ 10.0
$node(5) set Y_ 30.0
$node(5) set Z_ 0
$node(6) set X_ 20.0
$node(6) set Y_ 30.0
$node(6) set Z_ 0
$node(7) set X_ 30.0
$node(7) set Y_ 30.0
$node(7) set Z_ 0
$node(8) set X_ 40.0
$node(8) set Y_ 30.0
$node(8) set Z_ 0
$node(9) set X_ 50.0
$node(9) set Y_ 20.0
$node(9) set Z_ 0
$node(10) set X_ 10.0
$node(10) set Y_ 20.0
$node(10) set Z_ 0
$node(11) set X_ 20.0
$node(11) set Y_ 40.0
$node(11) set Z_ 0
$node(12) set X_ 30.0
$node(12) set Y_ 40.0
$node(12) set Z_ 0
$node(13) set X_ 40.0
$node(13) set Y_ 40.0
$node(13) set Z_ 0
$node(14) set X_ 50.0
$node(14) set Y_ 30.0
$node(14) set Z_ 0
$node(15) set X_ 50.0
$node(15) set Y_ 40.0
$node(15) set Z_ 0
```

9.- Determinación del tamaño de los nodos.

```
#Determinar el tamaño de los nodos en el simulador
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns initial_node_pos $node($i) 3
}
```

10.- Establecimiento de las conexiones entre los nodos.

Resultados

```
#Setup a UDP connection
set udp0 [new Agent/UDP]
$udp0 set class_ 1
$ns attach-agent $node(0) $udp0
set null0 [new Agent/Null]
$ns attach-agent $node(10) $null0
$ns attach-agent $node(1) $null0
$ns attach-agent $node(2) $null0
$ns attach-agent $node(3) $null0
$ns attach-agent $node(14) $null0
$ns attach-agent $node(15) $null0
$ns attach-agent $node(5) $null0
$ns attach-agent $node(6) $null0
$ns attach-agent $node(7) $null0
$ns attach-agent $node(8) $null0
$ns attach-agent $node(9) $null0
$ns attach-agent $node(11) $null0
$ns attach-agent $node(12) $null0
$ns attach-agent $node(13) $null0
$ns attach-agent $node(4) $null0

$ns connect $udp0 $null0
$udp0 set fid_ 2
```

11.- Establecimiento de tráfico en la red.

```
#Setup a CBR over UDP connection
set cbr0 [new Application/Traffic/CBR]
$cbr0 attach-agent $udp0
$cbr0 set type_ CBR
$cbr0 set packet_size_ 1000
$cbr0 set rate_ 1mb
$cbr0 set random_ false
```

```
#Calendarización de eventos CBR
$ns at 0.1 "$cbr0 start"
```

```
#Conexion de FTP sobre TCP
set tcp0 [new Agent/TCP]
$tcp0 set class_ 2
$ns attach-agent $node(0) $tcp0
set ftp0 [new Application/FTP]
$ftp0 attach-agent $tcp0
set sink0 [new Agent/TCPSink]
$ns attach-agent $node(1) $sink0
$ns attach-agent $node(2) $sink0
$ns attach-agent $node(3) $sink0
$ns attach-agent $node(5) $sink0
$ns attach-agent $node(6) $sink0
$ns attach-agent $node(7) $sink0
$ns attach-agent $node(8) $sink0
$ns attach-agent $node(9) $sink0
$ns attach-agent $node(10) $sink0
$ns attach-agent $node(11) $sink0
$ns attach-agent $node(12) $sink0
$ns attach-agent $node(13) $sink0
$ns attach-agent $node(14) $sink0
$ns attach-agent $node(15) $sink0
$ns attach-agent $node(4) $sink0
```

Resultados

```
$ns connect $tcp0 $sink0  
$tcp0 set fid_ 0
```

12.- Proceso de finalización.

```
#Calendarización de eventos FTP  
$ns at 0.0 "$ftp0 start"  
  
$ns at 120 "finish"  
  
#Proceso de finalización de la simulación  
proc finish {} {  
    global ns namtrace tracefile  
    $ns flush-trace  
    close $namtrace  
    close $tracefile  
    exec nam ina5.nam &  
    exit 0  
}  
#Ejecución del simulador  
$ns run
```

Como se puede observar en el paso 11, la simulación consiste en el envío y recepción de paquetes del nodo 4 (que contiene los sensores de Nitratos, pH, Oxígeno Disuelto) al nodo 0 que es el Gateway. Se ha escogido este par de nodos ya que son los más distantes.

El Throughput

El Throughput entre el *nodo 0* y *nodo4* mientras el resto de nodos se hallan transmitiendo a la vez, se muestra en la Figura 3.34.

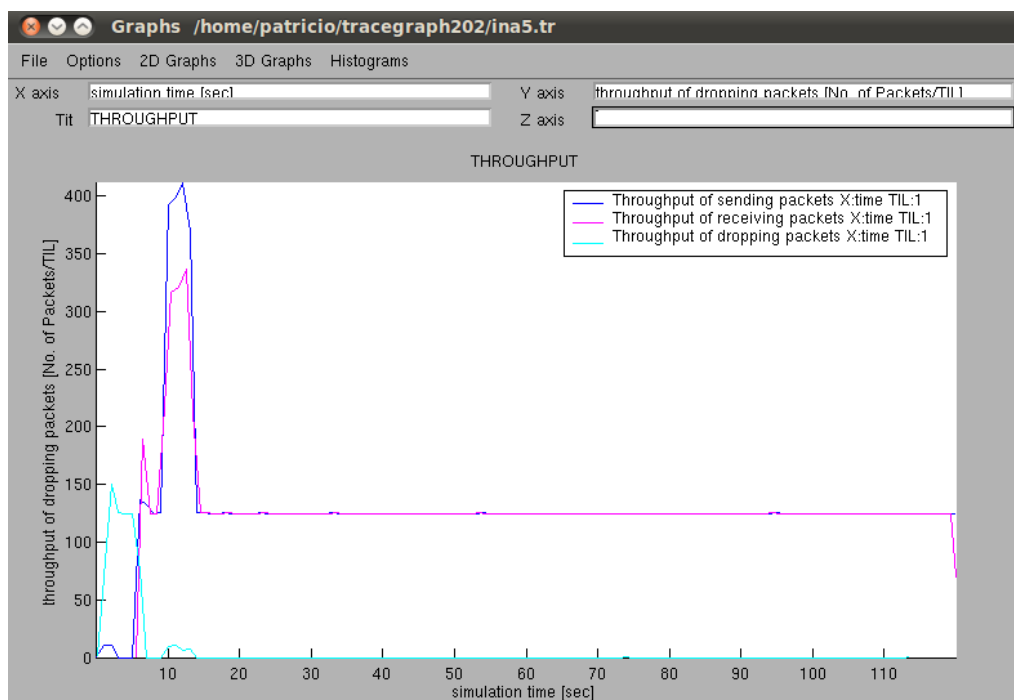


Figura 3. 34Throughput entre el nodo 4 y nodo 0.

En la Figura 3.34 se observa que el Throughput enviado está en color azul, el recibido en color rojo y el resultado de paquetes perdidos esta en color azul.

Entre 0 y 5 segundos el *nodo 4* inicia su búsqueda de rutas al *nodo 0*, existe un tráfico inicial donde envía paquetes de reconocimiento de su destino pero sin lograrlo, alcanza su valor máximo de 400 paquetes por segundo a los 13 segundos hasta que a los 15 segundos logra comunicarse con su destino e inicia entonces una entrega constante de aproximadamente 135 paquetes por segundo.

Se observa que entre 0 y 5 segundos, la cantidad máxima de paquetes perdidos llega a los 150, que representa justamente el valor máximo de paquetes transmitidos en cuanto se establece la ruta entre el nodo 0 y nodo 4. Se observa que el tiempo de establecimiento de la comunicación bidireccional es de aproximadamente 15 segundos, donde el flujo de paquetes es constante e igual a 125 paquetes por segundo. Este tiempo es realmente muy pequeño comparado con el servicio que prestará a las estaciones de monitoreo.

La suma acumulada

La suma acumulada de paquetes enviados, recibidos y perdidos, se halla en la Figura 3.35.

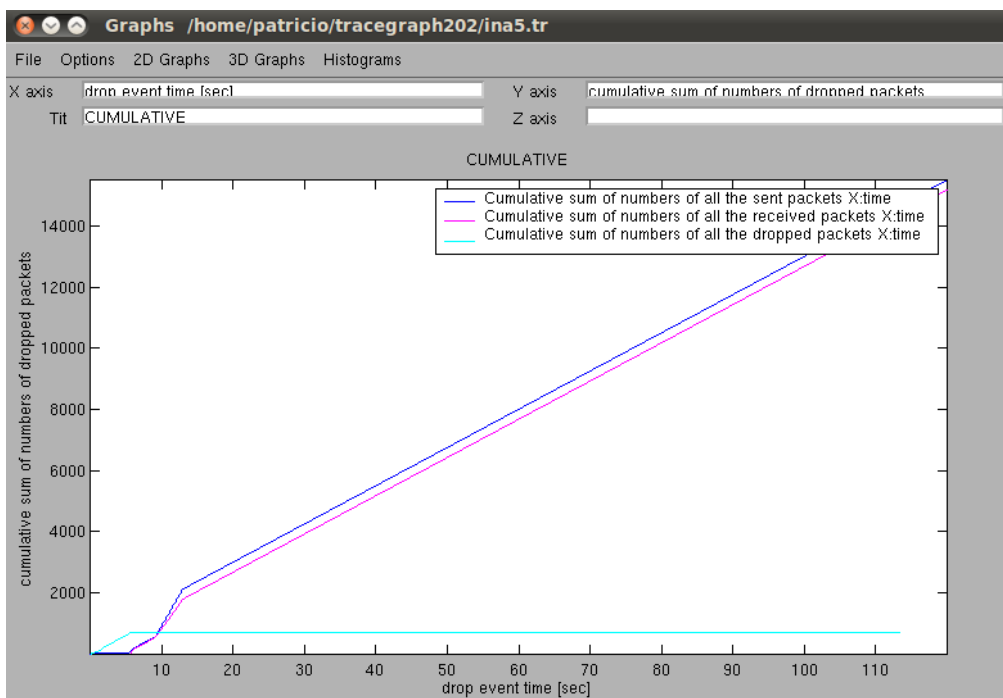


Figura 3. 35Suma acumulada de paquetes transmitidos y recibidos entre el nodo 4 y el nodo 4.

Resultados

La Figura 3.30 muestra que hasta los 5 segundos hay un aproximado de 800 paquetes perdidos. A partir de los 13 segundos existe un flujo constante de paquetes y por lo tanto un valor constante de 600 paquetes perdidos.

La cantidad de paquetes generados, enviados y recibidos aumenta en la medida que transcurre el tiempo de simulación.

Throughput promedio

El Throughput promedio se halla en la Figura 3.36 en función del tamaño de los paquetes transmitidos.

Se observa en la Figura 3.36 que para el valor máximo de tamaño del tamaño del paquete, esto es 259 bytes, el throughput máximo es de 120 paquetes por segundo. Esto significa que la velocidad máxima de transmisión será:

$$Tr_{max} \left(\frac{\text{bytes}}{\text{segundo}} \right) = 120 \left(\frac{\text{paq}}{\text{seg}} \right) * 259 \left(\frac{\text{bytes}}{\text{paq}} \right) = 31080 \left(\frac{\text{bytes}}{\text{seg}} \right)$$

Esto es 31.08 Kbps que es menor al valor teórico máximo de 250 Kbps.

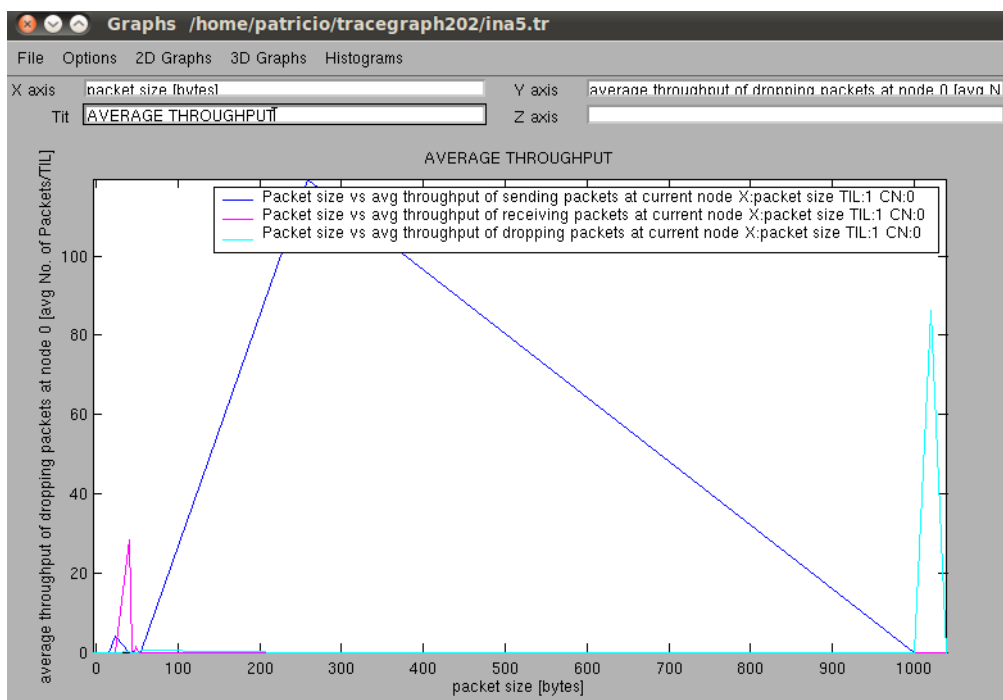


Figura 3. 36Throughput promedio.

Jitter de los paquetes recibidos

El Jitter de los paquetes recibidos entre el nodo 4 y nodo 0 se halla en la Figura 3.37. Se observa que existen dos fases bien diferenciadas, la primera corresponde a números de secuencia bajas producidas al inicio de la simulación, donde el Jitter oscila entre -4 y 10

Resultados

milisegundos. La segunda en cuanto se establece la ruta entre el nodo 0 y nodo 4 a partir de los 13 segundos aproximadamente, donde el Jitter se mantiene en 8 milisegundos hasta el final de la simulación.

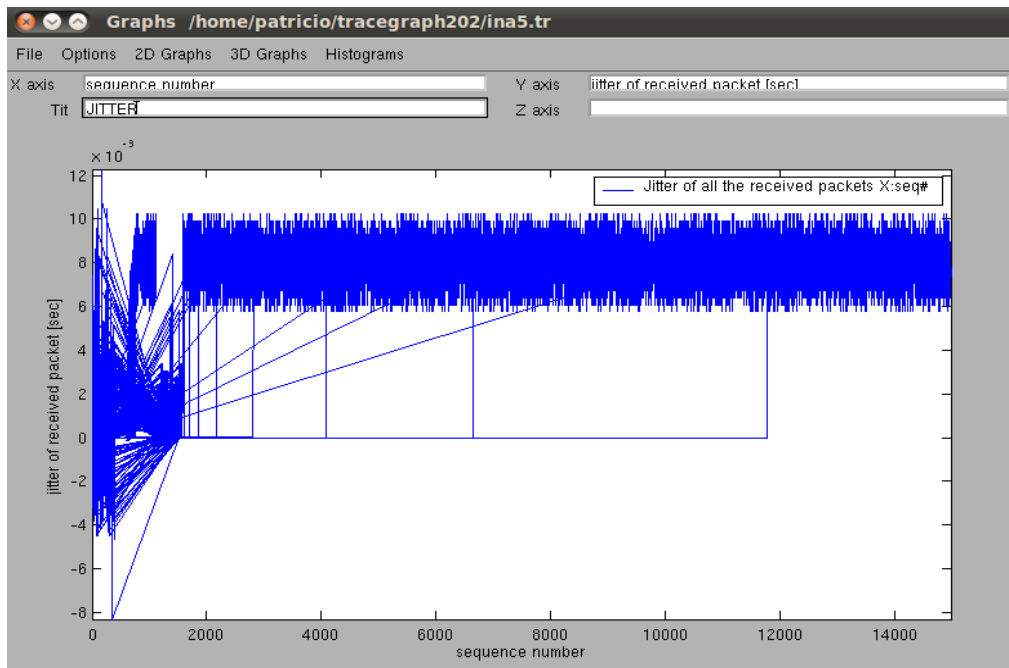


Figura 3. 37 Jitter de paquetes recibidos.

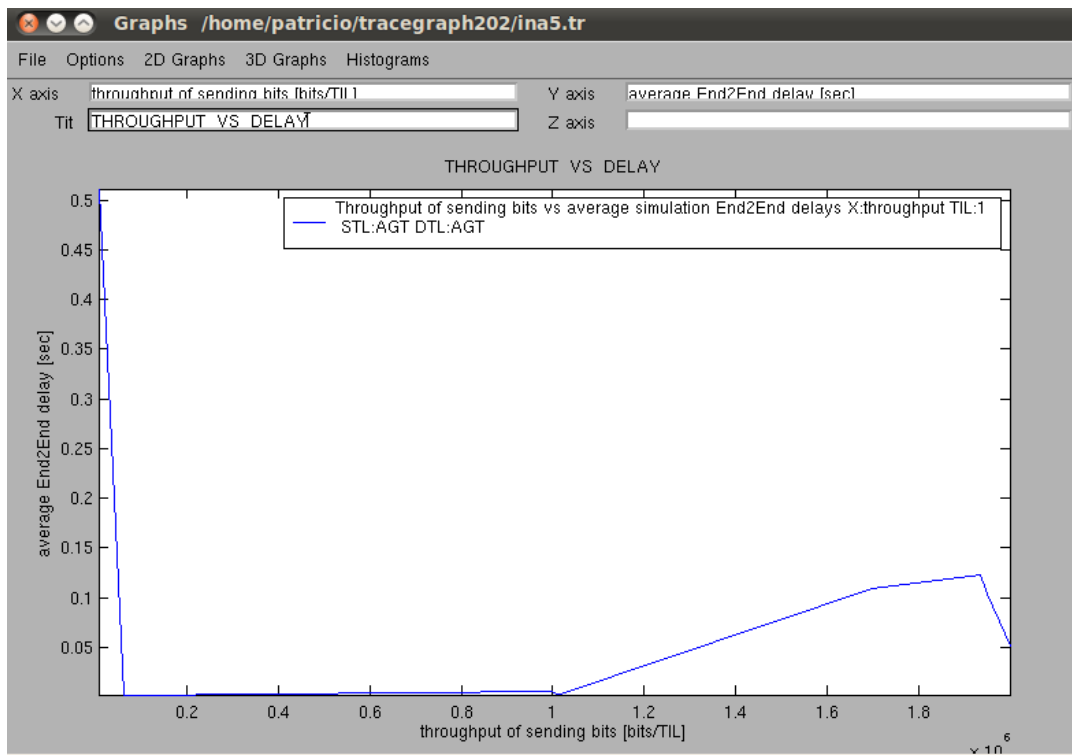


Figura 3. 38 Throughput de bit enviados versus promedio de retardo.

El Retardo promedio

El retardo promedio está en función del número de bits enviados y se halla en la Figura 3.38. Se observa que para un valor de 1.95×10^6 bits, el retardo es de 0.15 segundos. Este valor es aceptable debido al tipo de tráfico CBR y FTP inyectado en esta simulación. Este valor de retardo es muy pequeño comparado con los intervalos de tiempo de entrega de datos de los sensores al Gateway final que recolecta toda la información de las motas.

3.5.3 Simulación con el modelo de propagación: Shadowing

El parámetro a cambiarse en el archivo *ina5.tcl* será el modelo de propagación:

```
set val(prop) Propagation/Shadowing ;#Modelo Shadowing
```

Los parámetros que se visualizarán en esta simulación con TraceGraph serán los 3 principales que tienen que ver con la calidad del servicio (QoS), o sea El Throughput (Rendimiento), Delay (Retardo) y Jitter (Fluctuación o variabilidad de la latencia de los paquetes de datos recibidos). Toda esta información a partir del archivo de salida *ina5.tr*.

El Throughput

El Throughput entre el *nodo 0y nodo4* mientras el resto de nodos se hallan transmitiendo a la vez, se muestra en la Figura 3.39.

Se observa en esta Figura 3.39 que el Throughput para el modelo de propagación Shadowing tiene prácticamente la misma forma que el presentado en la Figura 3.34. Esto se puede explicar ya que la distancia de separación entre los nodos es solamente de 10 m.

El resto de los gráficos de suma acumulativa de paquetes, Jitter y retardos tienen la misma forma. Por esta razón no se han graficado en este trabajo.

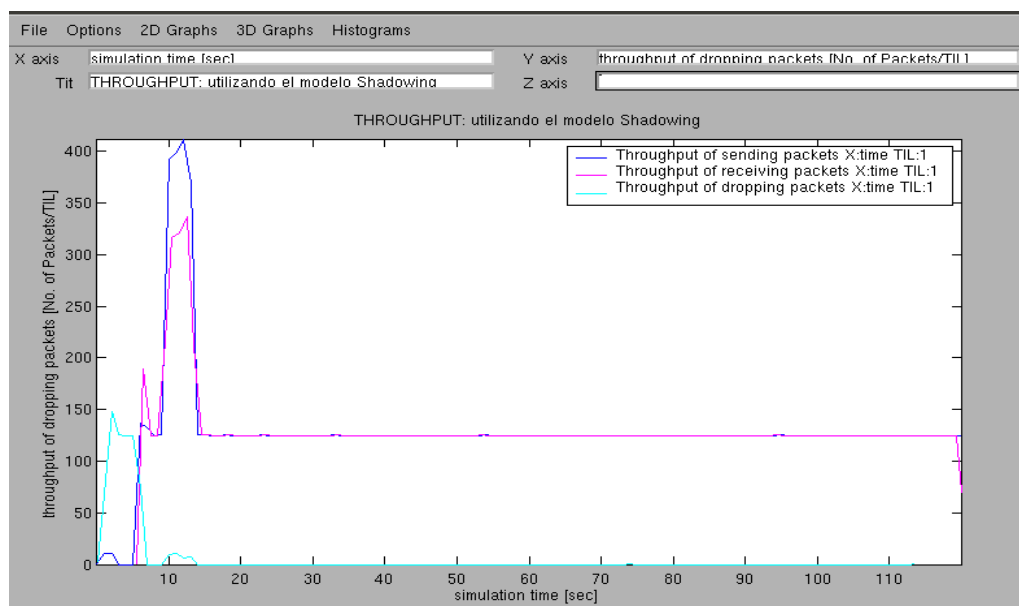


Figura 3. 39 Throughput entre el nodo 4 y nodo 0 para el modelo de propagación Shadowing.

3.6 Nodos de sensores inalámbricos, sondas de medición y equipos fotovoltaicos

Los sensores inalámbricos utilizados en el presente estudio son de marca Crossbow ya que son ampliamente utilizados en aplicaciones ambientales, muy seguros, versátiles y de costo razonable. Los sensores de nitratos, pH y Oxígeno Disuelto son de marca WTW, que así mismo presentan buenos rangos de medición, pueden realizar mediciones en línea y no requieren reactivos para hacer su trabajo. Un resumen de todos estos componentes se hallan en las Figura 3.40 y Figura 3.41.



Figura 3. 40 Conjunto de componentes Crossbow de las estaciones de monitoreo.

El conjunto de componentes Crossbow descritos en la Figura 3.40 han sido utilizados en una variedad de aplicaciones en todo el mundo con muy buenos resultados, esto permite asegurar su buen funcionamiento también para la presente aplicación.

Las sondas WTW utilizadas en este trabajo se muestran en la Figura 3.41.

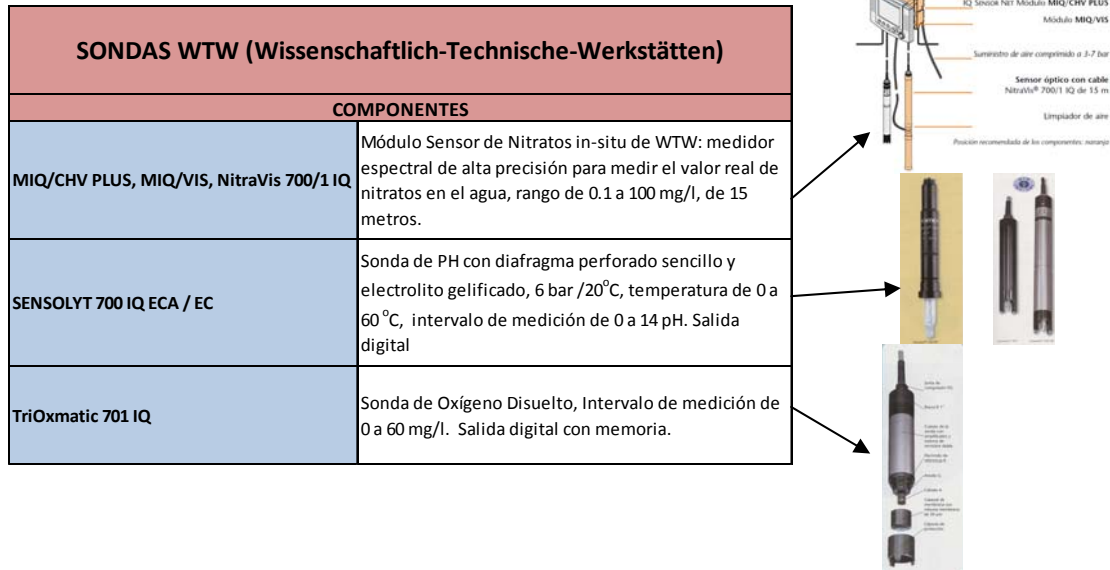


Figura 3. 41Conjunto de componentes Crossbow.

Estos productos WTW tienen la ventaja de su durabilidad, no utilizan reactivos para su funcionamiento, las mediciones son en línea y disponen de salidas analógicas y digitales.

En la Figura 3.42 se halla el esquema de conexión de los equipos WTW y Crossbow.

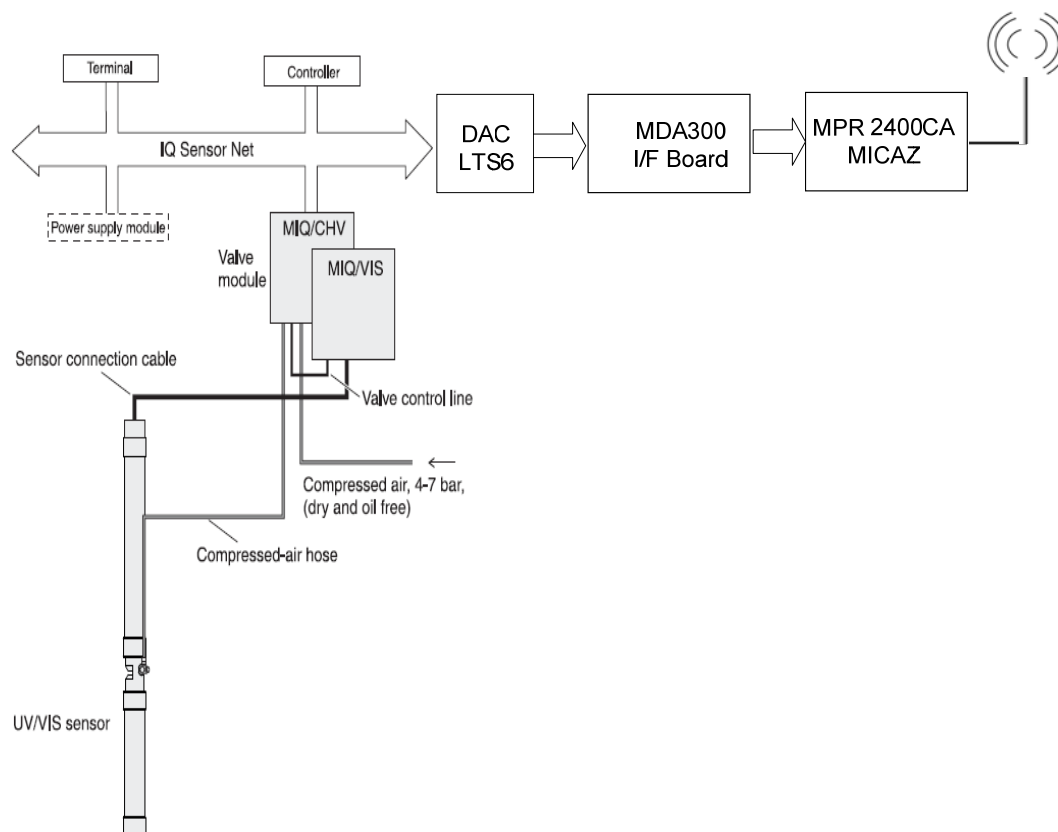


Figura 3. 42 Conexión de equipos WTW y Crossbow.

Es importante notar la necesidad de colocar un acondicionador de señales de los equipos WTW a los equipos Crossbow, esto se logra a través del DACLTS6 que es un convertidor de señales que acepta RS232 o RS485 con protocolos Modbus y las convierte a señales analógicas con escalas de 4-20mA, 0-20mA o 0-10V. En la Figura 3.43 se muestra el equipo y sus características técnicas.

Standard Features

- RS-232 or RS-485 serial input
- Choice of 3 protocols: Modbus RTU, Modbus ASCII, or Laurel ASCII
- Able to retrieve data from long character strings
- Data rates from 300 to 19,200 bps
- Isolated 4-20 mA or 0-10V transmitter output, user selectable
- Output resolution: 0.0015% of span (16 bits)
- Output accuracy: $\pm 0.02\%$ of span
- Update rate to 60/sec
- Detachable screw-clamp connectors
- Easy setup with PC-based [Instrument Setup Software](#)
- Dual solid state relays for alarm or control, isolated
- Universal AC power, 85-264 Vac

Options

- Low voltage power, 10-48 Vdc or 12-32 Vac

Figura 3. 43 Convertidor de RS232 o RS485 a salida analógica [39].

La Figura 3.43 muestra las especificaciones del Convertidor RS232/ RS485 a salida analógica necesario para el acoplamiento de los sistemas WTW y Crossbow.

El equipo fotovoltaico lo componen fundamentalmente, los paneles solares, reguladores de voltaje, inversores de tensión, baterías, cables, conectores y otros accesorios.

La Figura 3.44 muestra unos componentes del sistema fotovoltaico.

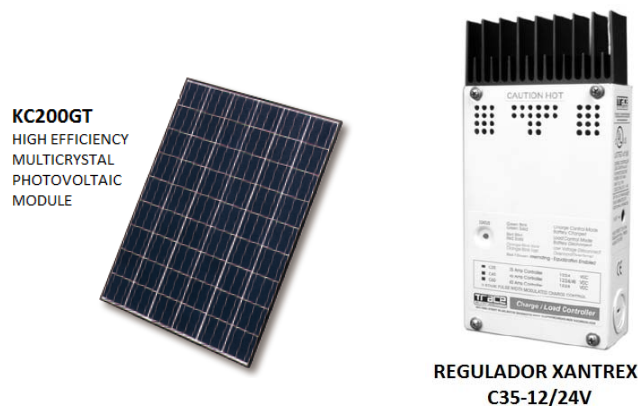


Figura 3. 44Equipos eléctricos del sistema fotovoltaico[41].

El sistema eléctrico de respaldo conformado por estos equipos, permite la provisión de energía eléctrica por un tiempo de 8 horas diarias durante 3 días. Se debe recordar que las estaciones de monitoreo se hallan cercanos a poblados que sí disponen de energía eléctrica. Sin embargo se ha diseñado el sistema fotovoltaico para brindarle seguridad al sistema de medición ya que existen problemas de cortes eléctricos inesperados.

3.7 Resumen de componentes de la Red de sensores inalámbricos y sondas de nitratos en aguas de zonas bananeras del Ecuador

El sistema de medición de pesticidas en ríos de zonas bananeras ecuatorianas propuesto en este trabajo, en resumen tiene los siguientes componentes:

- ✓ Sondas de medición (WTW) en línea de Nitratos, niveles de pH y oxígeno disuelto en aguas de río.
- ✓ Sensores inalámbricos (Crossbow) para la detección de temperatura ambiental, humedad relativa y luz solar. Un total de 16 sensores desplegados en un área de 80 metros cuadrados por estación de monitoreo, permiten monitorear variables ambientales y transmitirlos inalámbricamente a sumideros por cada estación de monitoreo. Siete estaciones de monitoreo instaladas a lo largo del río Jubones se hallan enlazadas inalámbricamente a través de equipos operando en la banda libre de 2.4GHz. Estas estaciones de monitoreo se hallan colocadas antes de las zonas bananeras y después de ellas con el objetivo de realizar estudios comparativos de los niveles de contaminación del agua.
- ✓ Sistemas eléctricos fotovoltaicos por cada estación de monitoreo para proveer energía eléctrica de emergencia en caso de fallar la red principal.

Resultados

La red de telecomunicaciones y todos sus nodos se hallan en la Figura 3.45.

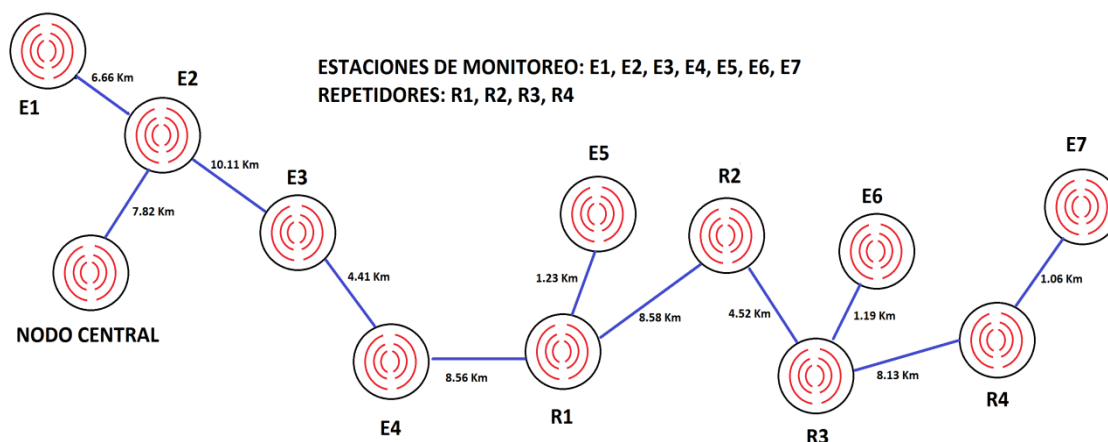


Figura 3. 45 Red de monitoreo de pesticidas en zonas bananeras del río Jubones.

En la Tabla 3.12 se hallan las coordenadas geográficas de las estaciones de medición y de cada uno de los repetidores.

En la Figura 3.46 se pueden visualizar los nodos utilizando Radio Mobile. Se inicia con la estación de monitoreo E7 (U11) en la zona más alta del río Jubones. Las estaciones que realmente se encuentran dentro de las zonas bananeras son E2, E3, E4 y E5. La estación E1 se encuentra aproximadamente a un kilómetro antes de la desembocadura del río en el océano Pacífico.

UNIDAD	NOMBRE	FUNCION	COORDENADAS	
E1	Hacienda La Raquel	Estación de medición	3°10'21",S; 79° 55'37", O	-3.1725°;-79.9269°
E2	Hacienda Matales	Estación de medición	3°13'30",S; 79° 53'52.7", O	-3.2250°;-79.8979°
E3	Hacienda San Antonio	Estación de medición	3°17'22.4",S; 79° 50'1.3", O	-3.2895°;-79.8336°
E4	Hacienda Cleotilde (Pasaje)	Estación de medición	3°18'56.8",S; 79° 48'14", O	-3.3157°;-79.8038°
R1	Cerro Casacay	Repetidor	3°19'37",S; 79° 43'39.2", O	-3.3269°;-79.7275°
E5, U6	Caserío Casacay	Estación de medición	3°19'1",S; 79° 43'22.3", O	-3.3169°;-79.7228°
R2, U7	Caserío de Porotillo	Repetidor	3°18'6.9",S; 79° 39'15.7", O	-3.3019°;-79.6543°
R3, U8	Cerro de Porotillo	Repetidor	3°19'56.2",S; 79° 37'38.3", O	-3.3322°;-79.6273°
E6, U9	Caserío de Porotillo	Estación de medición	3°19'21.8",S; 79° 37'55.8", O	-3.3227°;-79.6321°
R4, U10	Cerro de Pindo	Repetidor	3°19'25.6",S; 79° 33'16.3", O	-3.3237°;-79.5545°
E7, U11	Caserío Pindo	Estación de medición	3°18'55.9",S; 79° 32'58.8", O	-3.3155°;-79.5496°
Nodo Central, U12	Universidad de Machala	Nodo Central	3°14'42.5",S; 79° 57'56", O	-3.2451°;-79.9655°

Tabla 3. 12Coordenadas geográficas de cada nodo.

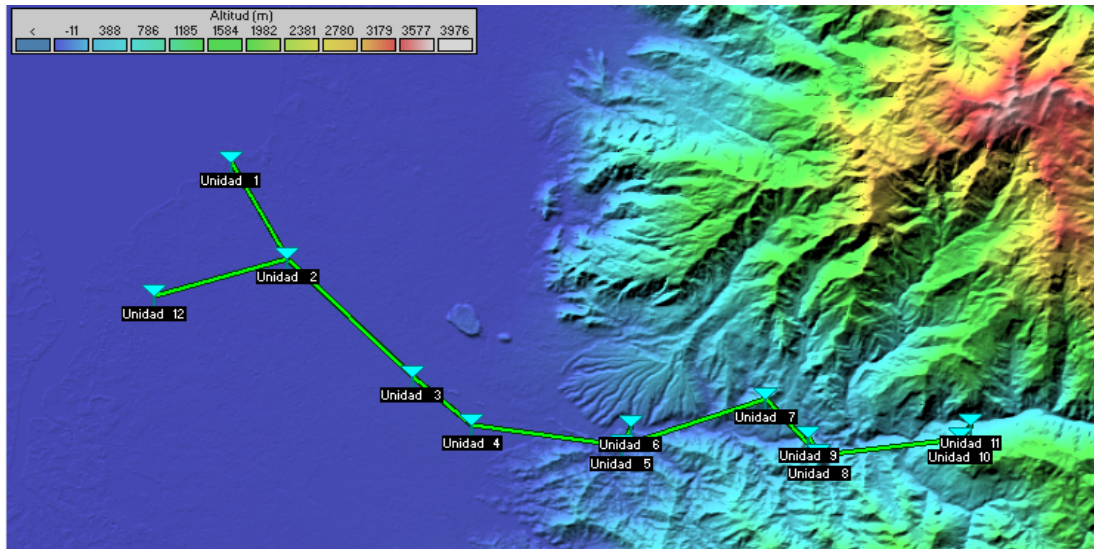


Figura 3. 46Despliegue de la red de monitoreo en Radio Mobile.

3.8 Estudio de propagación de señales y estudio de tráfico de datos

La herramienta utilizada para el estudio de propagación de señales entre cada estación de monitoreo y repetidores es Radio Mobile. En la Tabla 3.13 se halla un cuadro resumen de las mediciones realizadas a través de esta herramienta.

Item	Enlace	Distancia (Km)	Alturas htx, hrx (m)	Campo E dBuV/m	Prx relativo (dBm)	Nivel de Prx (dBm)
1	E1, E2	6.66	10, 15	48.40	22.40	-81.6
2	E2, N. Central	7.82	15, 20	46.20	20.20	-83.8
3	E2, E3	10.11	15, 15	43.70	17.70	-86.3
4	E3, E4	4.41	15, 15	50.60	24.60	-79.4
5	E4, R1	8.56	15, 15	42.50	16.50	-87.5
6	R1, E5	1.23	15, 15	60.80	34.80	-69.2
7	R1, R2	8.58	15, 15	44.00	18.00	-86.0
8	R2, R3	4.52	15, 10	48.70	22.70	-81.3
9	R3, E6	1.19	10, 10	59.70	33.70	-70.3
10	R3, R4	8.13	10, 10	43.80	17.90	-86.1
11	R4, E7	1.06	25, 20	58.50	32.60	-71.4

Tabla 3. 13 Cuadro resumen de niveles de recepción.

Se observa en la Tabla 3.13 que los niveles de potencia de recepción superan al valor de la sensibilidad de los equipos de radio de -104 dBm.

En la Tabla 3.14 se muestra un resumen de los desvanecimientos calculados en cada vano.

Item	Enlace	Distancia (Km)	Rugosidad (m)	Ptx (dBm)	Probabilidad de Desvanecimiento (%)	Disponibilidad (%)	Tiempo de desvanecimiento plano en el mes más desfavorable
1	E1, E2	6.66	3.05500	-81.60	0.0100537790	99.989946220	4.343232381
2	E2, N. Central	7.82	2.95690	-83.80	0.0281803120	99.971819690	12.17389464
3	E2, E3	10.11	2.62460	-86.30	0.1264407420	99.873554920	54.624275290
4	E3, E4	4.41	1.82570	-79.40	0.0034345920	99.996565410	1.583743627
5	E4, R1	8.56	30.60898	-87.50	0.0041519130	99.995848090	1.793626625
6	R1, E5	1.23	11.89771	-69.20	0.0000006223	99.999999380	0.000268861
7	R1, R2	8.58	96.98890	-86.00	0.0006609270	99.999339070	0.285520489
8	R2, R3	4.52	52.21030	-81.30	0.0000732420	99.999926760	0.031640724
9	R3, E6	1.19	61.41813	-70.30	0.0000068279	99.999999320	0.000294964
10	R3, R4	8.13	184.49383	-86.10	0.0002494170	99.999750580	0.107748077
11	R4, E7	1.06	160.44210	-71.40	0.0000000225	99.999999980	0.000009703

Tabla 3. 14 Desvanecimientos en cada vano.

El vano número tres de E2 a E3 con una distancia de 10.11 Km presenta un desvanecimiento de mayor duración, esto es de 54.62 minutos. Se trata de un vano con pocas irregularidades donde el multitrayecto puede ser perjudicial.

3.9 Simulación de la red de sensores inalámbricos mediante NS2

Para la simulación de la red es importante definir algunos parámetros que indican el tipo de red con sus distintas características, como por ejemplo, el canal de comunicaciones, el modelo de propagación, el tipo de interface de la red, la capa MAC, el tipo de cola, el tipo de antena, el protocolo de enrutamiento, la topología de a red, etc.

Para la simulación de la red se ha escogido un total de 16 nodos sensores inalámbricos apostados en un área de aproximadamente 800 metros cuadrados en cada estación de monitoreo que se halla a orillas del río Jubones en una extensión de aproximadamente 50 Km. En total existirán entonces 112 nodos a lo largo del río.

La topología de la red de sensores es fija y se halla mostrada en la Figura 3.47. El *nodo 0* funciona como Gateway (sumidero) de toda la información recopilada por todos los sensores de esa estación de monitoreo. El *nodo 4* recolecta toda la información generada por las sondas de Nitratos, pH, Oxígeno Disuelto, temperatura, humedad relativa y luz solar en el sitio específico de la estación de monitoreo.

El nodo 0 se conecta inalámbricamente a la PC que a su vez se halla conectada a un equipo de radio en 2.4GHz; este equipo se conecta con otros similares y depositan toda

su información en el nodo central en una PC para su posterior procesamiento de la información de la Universidad de Machala.

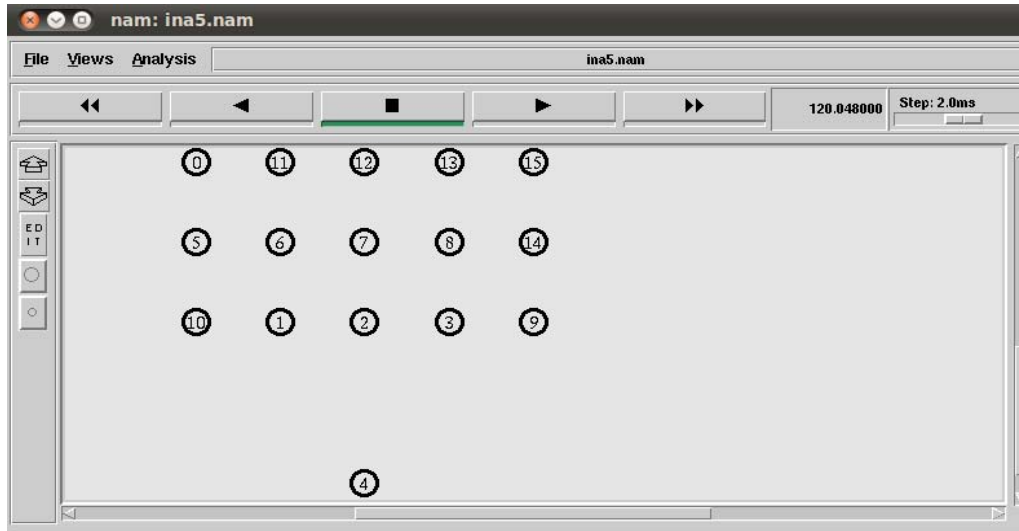


Figura 3. 47Topología de red de sensores en cada estación de monitoreo.

3.10 Base de datos de la información recopilada

La recopilación de la información en el nodo central se lo realizará fundamentalmente respecto de las siguientes variables: concentración de nitratos en el agua del río, niveles de pH, niveles de Oxígeno Disuelto en el agua, temperatura ambiente, humedad relativa del entorno y nivel de luz solar.

Toda esta información se la puede tratar a través de un Sistema de Información Geográfica. Este sistema integra organizadamente hardware, software, datos geográficos y personal, orientados a capturar, almacenar, recuperar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada para el problema de monitoreo de pesticidas en aguas de zonas bananeras ecuatorianas.

Se pueden encontrar algunas versiones de Sistemas de Información Geográfica abiertas en la siguiente dirección <http://opensourcegis.org/>.

Por ejemplo, existe una aplicación denominada *OpenGis Sensor Model Language (SensorML)* [51], que especifica modelos y códigos XML para proveer un marco que engloba la geometría, la dinámica, y las características de observación de los sensores y sistemas de sensores. Existen diferentes tipos de sensores, desde simples termómetros

Resultados

visibles, hasta microscopios electrónicos complejos y sistemas de observación satelital. Con la aplicación SensorML, todos los procesos y componentes se pueden codificar en un esquema amigable al usuario [51].

PARTE IV
CONCLUSIONES

PARTE IV

CONCLUSIONES

Conclusiones

- ✓ El cuidado del suelo y las aguas es responsabilidad de todos los que habitamos la tierra. Si no se controlan a los grandes generadores de basuras en las ciudades y pueblos, industrias, agroindustria, y otros contaminantes, se irá degradando cada vez más el suelo y el agua necesaria para nuestra supervivencia.
- ✓ Existen elementos básicos en el suelo como son el nitrógeno, fósforo y potasio, que requieren las plantas para vivir. Estos elementos presentes en cantidades excesivas fuera de la denominación 8-24-16 (8% de N, 24% de P₂O₅ y 16% de K₂O [18], pueden afectar seriamente los nutrientes básicos del suelo. Es muy importante por lo tanto, las acciones de *monitoreo y control* de estos elementos en el suelo ya que filtrándose en éste pueden contaminar los ríos y corrientes subterráneas de agua.
- ✓ La contaminación a gran escala en el Ecuador producto de la industria bananera se inicia aproximadamente desde 1963 y más aún a partir de 1970 con la industria petrolera. El Ecuador considerado en un momento como el primer exportador de banano en el mundo registra grandes acciones tendientes a preservar el medio ambiente por efecto de fertilizantes y pesticidas. Solamente hay registros de tareas orientadas al cuidado del medio ambiente por efecto de la industria petrolera.
- ✓ La producción bananera en el Ecuador se realiza en más de 20 provincias del territorio continental. La región costanera aporta con el 89% de la producción nacional, la región de la sierra con el 10% y la región oriental con el 1%. En las plantaciones de banano se realizan entre 15 y 20 ciclos de fumigación de fungicidas al año, y pueden durar de 7 a 10 días cada uno. Aún así los grandes industriales bananeros como por ejemplo de la provincia de El Oro, no disponen de programas conscientes de control de suelos y aguas por efecto del uso de pesticidas, fertilizantes y agroquímicos en general.
- ✓ Se requiere entonces de programas de control y monitoreo del uso indiscriminado de pesticidas y fertilizantes en las zonas bananeras. Así también de los ríos que cruzan estas zonas bananeras, ya que en su trayectoria también nutren y sirven a otras zonas agrícolas, y también son parte fundamental de la vida animal.
- ✓ El presente trabajo constituye un gran esfuerzo acerca del estudio de sistemas de monitoreo de pesticidas en aguas de río de zonas bananeras mediante el uso de sondas de pesticidas de buena calidad, y especialmente de sensores inalámbricos WSN que por su gran versatilidad, bajo consumo, tamaño reducido y otras

Conclusiones

grandes ventajas, permiten conformar grandes redes de de datos cubriendo zonas de difícil acceso.

- ✓ El diseño de redes de telecomunicaciones que transporten grandes cantidades de información detectadas por los sensores inalámbricos WSN, a sitios distantes para su posterior análisis de expertos ambientales, constituye en sí una gran herramienta electrónica e informática que facilitará la realización de estudios de impacto ambiental.
- ✓ El impacto ambiental que tiene el uso de agroquímicos y pesticidas en la industria bananera tiene un efecto negativo no solamente para los ríos, sino a todo el entorno que rodea a esas zonas bananeras en las cuales hay también habitantes que han vivido por muchos años, recibiendo en sí mismos los efectos de la contaminación ambiental
- ✓ Se han estudiado las tecnologías de sondas electrónicas que permiten realizar mediciones en línea, de nitratos, pH y oxígeno disuelto, con la gran ventaja que no requieren reactivos para su funcionamiento. Esto permite realizar miles de mediciones en el sitio durante el tiempo de la vida útil de los productos WTW, esto es 35000 horas.
- ✓ Se han estudiado los sensores inalámbricos WSN de Crossbow que por su gran versatilidad y confiabilidad han sido considerados en este proyecto para el diseño de la red de sensores inalámbricos orientados a la detección de pesticidas en aguas de zonas bananeras en el Ecuador.
- ✓ La utilización de herramientas de software como Radio Mobile han permitido un estudio de propagación de 11 radioenlaces constitutivos de esta red de monitoreo. La utilización de mapas digitales de la zona de interés, permitirá una georeferenciación de cada estación de monitoreo con fines de control y mantenimiento de las mismas.
- ✓ El estudio de la herramienta NS2 fue muy importante en este trabajo ya que permitió estimar el tráfico generado en cada estación de monitoreo, verificándose una velocidad máxima de 31.08 kbps. Esta velocidad es suficiente para encaminar los datos generados por los sensores y las sondas.
- ✓ Tanto el retardo como el Jitter producto de la simulación no exceden las décimas de segundo. Esto es normal y suficiente para esta aplicación de monitoreo de variables ambientales donde no es muy crítica la latencia.

Trabajo futuro

- ✓ Una vez realizado el estudio de un Sistema de monitoreo de pesticidas en aguas de río de zonas bananeras mediante sensores inalámbricos WSN, el siguiente paso sería el estudio económico y su propuesta al Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- ✓ En principio los 112 sensores (16 por cada una de las 7 estaciones de monitoreo) se hallan en la rivera del río Jubones, pero sería interesante conocer la naturaleza de las variables como temperatura, humedad relativa, y otras variables de

Conclusiones

interés, en zonas al interior de las plantaciones bananeras. Esto implicaría la extensión de la red de sensores al interior de esas plantaciones.

- ✓ El fenómeno de lixiviación de los pesticidas en las zonas bananeras es muy complejo. Se han realizado algunas investigaciones tendientes a modelar matemáticamente este fenómeno con el fin de profundizar el estudio acerca del filtrado de pesticidas, fertilizantes y otros químicos en aguas subterráneas. Pero resulta difícil modelar este fenómeno ya que depende de la naturaleza del suelo como compactación, composición química, influencia de las lluvias, modificaciones a los terrenos por parte de los agricultores, etc. Por lo tanto, un próximo trabajo sería la utilización de WSN al interior de estas zonas para el estudio de la calidad del suelo y de aguas subterráneas que seguramente se hallan afectadas por el uso de agroquímicos.
- ✓ El estudio de los datos recopilados en la base de datos geolocalizada se podría poner a disposición de la comunidad científica para comprobar los modelos de lixiviación de solventes enumerados en el capítulo III.
- ✓ Se podrían realizar estudios de propagación de señales a 2.4 GHz con el estándar IEEE 802.15.4 en zonas bananeras, en la que se puede modelar la obstrucción de las plantas y el entorno en general.

PARTE V
ANEXOS

ANEXO No 1: Hoja electrónica para descarga gratuita de HYDRUS 2.01.0980 Demo.

<http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?h3d-downloads>

The screenshot shows a web browser window displaying the 'HYDRUS (2D/3D) Downloads' page. The browser's address bar shows the URL: <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?h3d-downloads>. The page content includes a navigation menu on the left, a main text area with instructions, and a table of installation programs for HYDRUS 2.x.

HYDRUS (2D/3D) Downloads

On this page you can find the latest installation programs for both versions of HYDRUS (2D/3D), i.e. **version 2.x** and **version 1.x**. However, unlike the previous version 1.x, the demo version for HYDRUS 2.x **cannot be changed by activation to the full version**. The full version is now available only to customers who purchased a license for version 2.x. They will receive a password to their account on [HYDRUS license server \(ELIS\)](#) where they find the installation programs and other information needed to install and activate the software.

- Instructions for HYDRUS installation and activation.
- Important Notice for users of Internet Explorer 9

Installation Programs for HYDRUS 2.x

Here you can download the latest **demo version** of HYDRUS 2.x. The demo version does not allow you to run calculations and save data. However, you can look at results of some prepared examples and try out almost all functions of HYDRUS GUI.

Version	Released	Download	Size	Comment
2.01	06.05.2011	Hydrus3D_2.01.0980_Demo.exe	72 MB	This is a DEMO version, the full version is available in ELIS

- HYDRUS 2.x User Manual (7.5 MB)
- HYDRUS 2.x Technical Manual (3.6 MB)

Installation Programs for HYDRUS 1.x

Here you can download the latest installation program for HYDRUS 1.x. Without activation, the program works as a demo version, i.e. it does not allow you to run calculations and save data. However, you can look at results of some prepared examples and try out almost all

PARTE VI

BIBLIOGRAFÍA

[1] Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América. CICEANA, A.C.

[2] Claudio Benedito Baptista Leite, *Contaminación de Agua y Suelos*, Instituto de Investigaciones Tecnológicas de Sao Paulo-IPT.

[3] Anónimo, www.agua.uji.es/pdf/leccionRH21.pdf, Julio 2011.

[4] Water Treatment Solutions LENNTECH, <http://www.lenntech.es/nitratos.htm>, Julio 2010.

[5] Inés García, *Contaminación por fitosanitarios. Plaguicidas*, <http://edafologia.ugr.es/conta/tema13/clasif.htm>, Junio 2011.

[6] Universidad Autónoma de Santo Domingo, *Contaminación del Agua*, <http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/11CAgu/100CoAcu.htm>, Junio 2011

[7] Humedad, <http://es.wikipedia.org/wiki/Humedad>, Junio 2011.

[8] Depósito de documentos de la FAO, PARTE A Evaluación de la Contaminación, <http://www.fao.org/docrep/005/x2570s/X2570S02.htm#partA.1>, Junio 2011,

[9] Edufuturo, <http://www.edufuturo.com/educacion.php?c=1350>, Julio 2011.

[10] Centro de Información e Inteligencia Comercial (CICO), *Perfiles del Producto, Perfil de Banano y Plátano*, Ecuador Exporta CORPEI, Julio 2009.

[11] Oracle ThinkQuest Education Foundation, <http://library.thinkquest.org/C005501F/banano.htm>, Julio 2011.

[12] Silvia Susana Huayamave Correa, Carola Resabala Z., *Determinación y Evaluación de los Plaguicidas Residuales en Banano Ecuatoriano de Consumo en la Ciudad de Guayaquil en el Marco de Seguridad Alimentaria*, Escuela Superior Politécnica del Litoral.

[13] Anónimo, <http://www.accionecologica.org/descargas/alertas/plaguicidas/Impacto%20de%20las%20obanaderas%20%20.doc>, Julio 2011.

- [14] FAO, *Código Internacional de Conducta para la Distribución y Utilización de Plaguicidas*, Adoptado por el 123º periodo de sesiones del Consejo de la FAO, Noviembre 2002.
- [15] Miliarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente, <http://www.miliarium.com/paginas/leyes/internacional/Ecuador/Residuos/RSAB.asp>, Julio 2011.
- [15] Ministerio del Ambiente Ecuador, <http://ambiente.gov.ec/contenido.php?cd=86>, Julio 2011.
- [16] J. López, F. Soto, J. Suardíaz, A. Iborra, *Red de Sensores Inalámbrica para Agricultura de Precisión*, Paper, Universidad Politécnica de Cartagena, (Cap. 2, rsi.pdf).
- [17] Evandro Chartuni, Francisco de Assis de Carvalho, Daniel Marcal, Emilio Ruiz, *Agricultura de precisión, Nuevas herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa agropecuaria*, <http://webiica.iica.ac.cr/bibliotecas/rep/iica/B0483e/B0483e.pdf>, Junio 2011.
- [18] InfoAgro, Instrumental, http://www.infoagroisp.com/infoagro/instrumentos_medida/instrucciones/instrucciones_kit_oxigeno_disuelto_hi3810.pdf, Junio 2011.
- [19] SIAMBIENTE, El Sistema SocioAmbiental del Ecuador, http://www.siise.gov.ec/PageWebs/Siambiente/macmed_sismon.htm, Junio 2011.
- [20] Wikipedia, Variables Ambientales, http://es.wikipedia.org/wiki/Variables_ambientales, Junio 2011.
- [21] Geovana Cecilia Narvaez Ortiz, *Automatización de un sistema de riego dedicado a la producción florícola basado en las tecnologías de agricultura de precisión y en telemetría utilizando la plataforma de comunicaciones de telefonía móvil GPRS*, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador, 2009.
- [22] Wikipedia, http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15, Junio 2011.
- [23] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, Taieb Znati, *Wireless Sensor Networks, Technology, Protocols, and Applications*; A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007, ISBN 978-0-471-74300-2.
- [24] Anexo I Protocolo ZigBee, <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB.pdf>, Junio 2011.
- [25] Bonita Banana, www.bonita.com, Julio 2011.

[26] Centro de Información e Inteligencia Comercial CICO, Perfiles de Producto, Perfil de Banano y Plátano, Ecuador Calidad de Origen, CORPEI, Julio 2011.

[27] Apunte de Economía, Dirección General de Estudios, El Banano en el Ecuador. Estructura de mercados y formación de precios, Elaborado por Agenda de Inserción del Ecuador a los Mercados Mundiales, Enero 2004.
<http://www.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/Apuntes/ae42.pdf>, Julio 2011.

[28] Degser Laboratorios,
<http://www.fertilizando.com/articulos/Caracteristicas%20y%20Fertilizacion%20Cultivo%20Banano.asp>, Julio 2010.

[29] Wikipedia, La provincia de El Oro, http://en.wikipedia.org/wiki/El_Oro_Province, Junio 2011.

[30] Wikipedia, Provincia de El Oro, <http://www.ecuale.com/eloro/>, Junio 2011.

[31] Ley de Gestión Ambiental Ley No. 37.RO/245 de 30 de Julio de 1999, *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua, LIBRO VI*, pag. 47.

[32] Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados,
<http://webcache.googleusercontent.com/custom?q=cache:qOsEmPWBM4oJ:192.188.59.56/bitstream/123456789/6078/38/LIBRO%2520VI%2520Anexo%25202%2520Remediaciacion%2520de%2520suelos.docx+gasometr%C3%ADa+suelos&cd=6&hl=es&ct=clnk&gl=es&client=pub-1231339564800273>, Agosto 2011.

[33] Crossbow, <http://www.cs.ucsb.edu/~nchohan/docs/moteManual.pdf>, Junio 2011.

[34] Consejo Nacional de Telecomunicaciones Conatel, Secretaría Nacional de Telecomunicaciones, *Plan Nacional de Frecuencias, Ecuador, Marzo 2008*.

[35] WTW,
http://www.wtw.com/downloads/manuals/ba75404e06_NitraVis_700_x_IQ_TS_MIQ_VIS.pdf, Junio 2011.

[36] Escuela Superior Politécnica del Ejército (ESPE), Quito, Ecuador, Av. Gral. Rumiñahui s/n.,
<http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do;jsessionid=B91F56A0B26F7DF679C2DA10FB9313C3?sectionCode=118>.

[37] E. Egea-López, J. Vales-Alonso, A. S. Martínez-Sala, P. Pavón-Mariño, J. García-Haro, *Simulation Tools for Wireless Sensor Networks*,
<http://ait.upct.es/~eegea/pub/spects05.pdf>, Junio 2011.

[38] The VINT Project; *The ns Manual, UC Berkeley LBL, USC/ISI, and Xerox PARC*, May 2010.

[39] Alfonso Roldán Bravo, *Estudio de modelos de movimiento en interiores para aplicación en entornos WLAN*, Universidad Politécnica de Catalunya, 2007.

[40] TutorMicman, <http://getch.wordpress.com/2011/04/20/installing-tracegraph2-02-application-in-ubuntu/>, Junio 2011.

[41] Holger Karl Andreas Willig, *Protocols and architectures for wireless sensor networks*, John Wiley & Sons, 2005, ISBN 0-470-09510-5.

[42] Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, *Handbook of Sensors Networks: compact wireless and wired sensing systems*, CRC PRESS Boca Raton London New York Washintong, D.C., 2004

[43] Telectronics, <http://www.teletronics.com/amplifiers2411g500mw.html>, Junio 2011.

[44] José María Hernando Rábanos, *Transmisión por Radio*, Cuarta Edición.

[45] Metodología estadística para la medición de la calidad del agua,

http://www.google.es/custom?q=calidad+agua+mediciones&cx=%21partner-pub-1231339564800273%3Aksq5fsi3sjf&ie=ISO-8859-1&adkw=AELyngVohqqZeG7nUgtNCduAiQP0roY_EhFwmswgLy_kRswxuU9KEYzKZIGx0bTjqDg5CjT0j6rc0TSW1JrCJHrp3_Rpt0xv-V3J7_HMCQN--1EBB9Ai0_U&cof=AH%3Aleft%3BALC%3AFFFFFF%3BBGC%3AFFFFFF%3BCX%3ASitioA%3BDIV%3AFFFFFF%3BFORID%3A13%3BGALT%3A008000%3BL%3Ahttp%3A%2F%2Fwww.google.com%2Fintl%2Fen_com%2Fimages%2Flogo_plain.png%3BLC%3AFFFFFF%3BLH%3A50%3BLP%3A0%3BT%3A000000%3BVLC%3A663399%3B&hl=es&oe=ISO-8859-1&safe=active&client=pub-1231339564800273&sa=2, Junio 2011.

[46]] Loayza V. Pablo, *Estudio de factibilidad para la implementación de sistemas autónomos fotovoltaicos en sectores marginales de la provincia de Pichincha*, Escuela Politécnica del Ejército, Quito Ecuador, 2007.

[47] Kyocera, <http://www.kyocerasolar.com/pdf/specsheets/KC200GT.pdf>, Junio 2011.

[48] Xantrex, <http://www.xantrex.com/>, Junio 2011.

[49] R. Poch Masegú et al., Estimación de los riesgos de lixiviación de nitratos en suelos agrícolas: ¿Enfoque numérico o analítico?, Actas de las VII Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo, A Coruña; Spain (2005).

[50] HYDRUS 2.01.0980 Demo, <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?h3d-downloads>, Junio 2011.

Bibliografía

[51] OGC Making Location Count, Sensor Model Language (SensorML), <http://www.opengeospatial.org/standards/sensorml>, Junio 2011.