

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS
PARA EL CONTROL DE RIEGOS POR GOTEO**

**NESLY DIANA CASTRO CASTRO
LUIS EDUARDO CHAMORRO FERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2012**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS
PARA EL CONTROL DE RIEGOS POR GOTEO**

**NESLY DIANA CASTRO CASTRO
LUIS EDUARDO CHAMORRO FERNÁNDEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**Director
M.Sc. CARLOS ANDRÉS VITERI MERA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2012**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Presidente de Tesis

Jurado 1

Jurado 2

San Juan de Pasto, Octubre de 2012

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos infinitamente a Fundación Social por su gran generosidad para apoyar esta investigación, principalmente al Dr. Guillermo Torres y a la Dra. Mariana Vallejo por creer en nosotros y por enseñarnos el sentido de la proyección social a través de su labor y su firme compromiso con la región; a la Universidad de Nariño, especialmente al Departamento de Electrónica encabezado por su Director Ing. Darío Fajardo por su excelente gestión y compromiso; a todos nuestros maestros por la enseñanza brindada durante todos estos años que forjaron nuestra formación profesional.

Un agradecimiento especial a nuestro director Ing. Carlos Viteri por creer en nuestras capacidades, por sus aportes valiosos, por su apoyo continuo y principalmente por su disponibilidad en todo momento para resolver todas nuestras inquietudes. Al Ing. Álvaro Dávila por su interés constante en este proyecto y por compartir su valiosa experiencia en el área agrícola que nos permitió enriquecer la investigación.

A los miembros de la cooperativa APROBORCA por permitirnos trabajar libremente en su predio. Gracias especiales al Sr. Hernando Jojoa por su cuidado, ayuda y su presencia continua durante todo el proceso de implementación. Gracias infinitas al Ing. José Dolores Rodríguez Martínez Q.E.P.D por sus consejos, su gran calidad humana y por sembrar en nosotros el deseo de impulsar el desarrollo de nuestra región.

A Dios y a la Virgen por despejar mi camino, a mi familia, por su apoyo incondicional durante todos estos años de estudio, por soportar cada una de mis decisiones, por ser mi fuerza, mi inspiración y mi luz. A Luis Eduardo, por ser mi compañero de lucha, por su honestidad, su dedicación y su calma contagiosa ante la adversidad. Gracias a todos esos ángeles terrenales que se cruzaron en mi camino para impulsarme hasta aquí. Y si valió la pena?... el tiempo lo dirá....
Nesly

A Dios por la vida y sabiduría con la que me bendijo a lo largo de mis estudios, a mis padres por el apoyo incondicional que me brindaron, por su total amor, entrega y constancia, a mi familia por estar pendiente de cada paso dado, a mis profesores de la Universidad de Nariño por los conocimientos adquiridos, a mi compañera Nesly Castro por dejarme formar parte de su grupo de trabajo, por su respaldo en cada paso dado a lo largo de mis estudios, por su dedicación y motivación para alcanzar cada meta que nos propusimos y a todos quienes de una u otra manera me acompañaron en este tramo de mi vida. *Lucho*

DEDICATORIA

*Dedicado a mi familia... porque tropezamos,
caímos, pero hoy estamos de pie. Nesly*

*Dedicado a mis padres porque a pesar de los
obstáculos que se presentaron, nunca dejaron
de apoyarme y a mi familia brindarme su cariño.
Luis Eduardo*

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	21
1. MARCO TEÓRICO	22
1.1 AGRICULTURA DE PRECISIÓN	22
1.1.1 Definición	22
1.1.2 Clasificación de la variabilidad	23
1.1.3 Segmentación del área cultivable	24
1.1.4 Tecnologías asociadas.....	24
1.2 AGUA Y CULTIVOS.....	26
1.2.1 Definición.....	26
1.2.2 Importancia del agua en los cultivos.....	26
1.2.3 Suelo y agua retenida.....	27
1.3 HUMEDAD DE SUELO.....	27
1.3.1 Definición.....	27
1.3.2 Pérdidas de humedad.....	28
1.3.3 Sistema de riego por goteo.....	29
1.3.4 Parámetros hídricos.....	31
1.3.5 Métodos de medición.....	32
1.4 SENSORES DE HUMEDAD DE SUELO 10HS	34
1.4.1. Especificaciones.....	34
1.4.2. Principio de funcionamiento.....	35
1.4.3. Calibración.....	36

1.5	REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS WSNs	36
1.5.1	Definición.....	36
1.5.2	Nodos sensores.....	38
1.5.3	Estación base o Nodo coordinador.....	40
1.5.4	Puerta de enlace.	40
1.6	ESTÁNDAR IEEE 802.15.4	40
1.6.1	Definición.....	40
1.6.2	Dispositivos físicos.	41
1.6.3	Dispositivos lógicos.....	41
1.6.4	Topologías.....	42
1.6.5	Arquitectura.	43
1.7	ZIGBEE	46
1.7.1	Definición.....	46
1.7.2	Dispositivos y Topologías.	46
1.7.3	Arquitectura.	47
1.7.4	Aplicaciones ZigBee en WSNs.	47
1.8	MÓDULOS XBEE – SERIES 1, SERIES 2 y PRO	48
1.8.1	Modos de operación y modos de comunicación.	50
1.8.2	Tramas API.....	50
1.8.3	Configuración.	51
1.9	CONTROL ON OFF CON HISTÉRESIS.....	52
1.9.1	Acciones de control.....	52
1.9.2	Banda de histéresis.....	53
1.10	ANTECEDENTES.....	53
2.	METODOLOGÍA	56

2.1	FASE I: REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	56
2.2	FASE II: ADQUISICIÓN DE DATOS	56
2.2.1	Reconocimiento del sitio de aplicación	57
2.2.2	Segmentación y muestreo del área cultivable	59
2.2.3	Calibración de sensores 10HS.....	62
2.2.4	Curvas y ecuaciones.....	65
2.3	FASE III: COMUNICACIÓN DE DATOS	68
2.3.1	Descripción del diseño	68
2.3.2	Nodo estación base – Coordinador	69
2.3.2.1	Módulo de procesamiento.....	70
2.3.2.2	Módulo de comunicación.....	70
2.3.2.3	Módulo de alimentación eléctrica e Interfaces.....	71
2.3.3	Nodos sensores – Dispositivos finales	71
2.3.3.1	Módulo de sensado.....	71
2.3.3.2	Módulo actuador.....	71
2.3.3.3	Módulo de comunicación/procesamiento.....	73
2.3.3.3	Módulo de alimentación eléctrica e interfaces.....	74
2.3.4	Nodos actuadores – Dispositivos finales	75
2.3.4.1	Módulo actuador.....	75
2.3.4.2	Módulo de comunicación/procesamiento.....	77
2.3.4.3	Módulo alimentación eléctrica e interfaces.....	77
2.3.5	Inicialización de red.....	78
2.4	FASE IV: DEFINICIÓN Y EJECUCIÓN DE ACCIONES DE CONTROL	78
2.4.1	Determinación de rango de humedad volumétrica permisible	79
2.4.2	Acción de control aplicada	82

2.4.3	Diseño de software de control.....	83
2.5	FASE V: IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.....	85
2.5.1	Presupuesto	85
2.5.2	Diseño de circuitos impresos	86
2.5.3	Montaje - Nodo coordinador.....	86
2.5.4	Montaje - Nodos sensores	87
2.5.5	Montaje Nodos actuador - Electroválvula	88
2.5.6	Montaje Nodos actuador - Motobomba	89
2.5.7	Caja de mando	89
2.5.8	Cableado para alimentación eléctrica.....	90
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	91
3.1	DESEMPEÑO DE LA WSN	91
3.2	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE MODOS DE RIEGO	91
3.3.2	Riego sitio-específico – Surco a Surco	92
3.2.2	Riego tradicional – Cultivo Total	94
3.3	PRUEBAS DE COBERTURA E INICIACIÓN DE RED.....	95
3.4	PRUEBAS DE INSTALACIÓN DE SENSORES	95
3.5	CONFIABILIDAD DE LÍMITES HÍDRICOS PARA CONTROL DE RIEGO	96
4.	RECOMENDACIONES.....	97
5.	CONCLUSIONES	98
	BIBLIOGRAFIA	99
	ANEXOS	102

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Evapotranspiración en las plantas	28
Figura 2. Parámetros hídricos en el suelo.....	31
Figura 3. Sensor 10HS	34
Figura 4. Ejemplo de una WSN conectada a Internet.....	38
Figura 5. Módulos de un Nodos Sensor.....	38
Figura 6. Topologías definidas en el estándar IEEE 802.15.4	42
Figura 7. Capas del Estándar IEEE 802.15.4 asociadas al modelo OSI.....	44
Figura 8. Bandas de operación del Estándar IEEE 802.15.4	45
Figura 9. Estándar ZigBee	47
Figura 10. Trama API - Estructura general	50
Figura 11. Ejemplo de sistema de control	52
Figura 12. Efecto de la banda de histéresis	53
Figura 13. Cultivo de fresas – Finca APROBORCA	58
Figura 14. Vista general del sitio de aplicación	59
Figura 15. Zonas de manejo definidas en el cultivo de fresas.....	60
Figura 16. Toma de muestras usadas para la investigación	61
Figura 17. Instalación de sensor 10HS en muestra de suelo	62
Figura 18. Recolección de datos de calibración.....	63
Figura 19. Regresión polinomial de grado 2 - Surco 2 y Surco 13.....	67
Figura 20. Regresión polinomial de grado 2 - Surco 25 y Todo Cultivo	67
Figura 21. Materiales usados para determinar CC	79
Figura 22. Extracción de suelo central de la Columna de Chapingo.....	80
Figura 23. Banda de Histéresis y señal de control.....	82

Figura 24. Diagrama de bloques general del sistema de control de riego	83
Figura 25. Modelo Trama API para activar actuador – formato hexadecimal	84
Figura 26. Interfaz gráfica diseñada	85
Figura 27. Diseño de PCB	86
Figura 28. Implementación nodo coordinador.....	87
Figura 29. Implementación nodos sensores	87
Figura 30. Implementación Nodo Actuador - Electroválvula.....	88
Figura 31. Implementación Nodo Actuador - Motobomba	89
Figura 32. Implementación Caja de Mando	90
Figura 33. Cableado de Alimentación Eléctrica	90
Figura 34. Riego sitio-específico - Surco 2	92
Figura 35. Riego sitio-específico - Surco 13	93
Figura 36. Riego sitio-específico - Surco 25	93
Figura 37. Riego tradicional - Cultivo Total	95

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones del sensor 10HS	35
Tabla 2. Características principales del estándar IEEE 802.15.4.....	41
Tabla 3. Parámetros de bandas de frecuencia	45
Tabla 4. Diferencias módulos XBee Series 1, Series 2 y PRO	49
Tabla 5. Tramas API más usadas	51
Tabla 6. Características del cultivo.....	57
Tabla 7. Componentes del sistema de riego por goteo en la finca APROBORCA	58
Tabla 8. Surcos representativos y parámetros de muestreo	61
Tabla 9. Elementos usados para calibración de sensores	63
Tabla 10. Ecuaciones para el cálculo de humedad volumétrica.....	64
Tabla 11. Humedad volumétrica de suelo θ_v y Voltaje de sensor durante 10 días	65
Tabla 12. Principales comandos de Curve Fitting ToolBox	66
Tabla 13. Coeficientes de ajuste	68
Tabla 14. Ecuaciones de calibración	68
Tabla 15. Características principales de la WSN diseñada.....	69
Tabla 16. Configuración módulo XBee PRO S2 - Nodo Coordinador	70
Tabla 17. Configuración módulo XBee PRO S2 - Nodo Sensor.....	73
Tabla 18. Características eléctricas de motobomba	76
Tabla 19. Componentes del circuito de potencia – Nodos actuadores	76
Tabla 20. Configuración módulo XBee PRO S2 – Nodos actuadores	77
Tabla 21. Capacidad de Campo de zonas de manejo y del cultivo	81
Tabla 22. Rangos de humedad volumétrica permisibles	81
Tabla 23. Presupuesto general.....	85

Tabla 24. Análisis de riego sitio -específico	94
Tabla 25. Análisis de riego tradicional.....	95

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Datos recolectados y evaluados para calibración	103
Anexo B. Diagramas de dispersión y regresiones	108
Anexo C. Distribución espacial de los nodos de red.....	112
Anexo D. Diagrama de bloques de los nodos de la WSN	113
Anexo E. Módulos e interfaces del Nodo Coordinador	114
Anexo F. Esquema circuital de Nodos Sensores.....	115
Anexo G. Esquema circuital de Nodos actuadores.....	116
Anexo H. Cálculo de Umbral de Riego y parámetros hídricos.....	118
Anexo I. API, paquetes y clases de Java usadas en el software de control	119
Anexo J. Diagrama de Flujo de Software de Control.....	120
Anexo K. Presupuesto Detallado por Módulos.....	122
Anexo L. Análisis general del consumo eléctrico de todo el sistema	124

GLOSARIO

AP (Agricultura de precisión): Conjunto de técnicas que permiten la gerencia localizada de cultivos, con el fin de reducir las ineficiencias en la producción agrícola y aumentar el retorno económico para el agricultor.

GPS (Global Positioning System): Sistema de posicionamiento global de navegación por satélite que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, persona o vehículo.

SIG (Geographic Information System): Sistema de información geográfica. Integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada.

CC (Capacidad de campo): Contenido de agua que retiene un suelo en contra de la fuerza de gravedad, en condiciones de equilibrio y cuando no existe extracción de agua del suelo por parte de las plantas.

PMP (Punto de marchitez permanente): Cantidad de agua retenida en un suelo, que es insuficiente para abastecer adecuadamente a la planta y esta se marchita irreversiblemente.

NAP (Nivel de agotamiento permisible): Nivel de humedad entre el límite superior (CC) y el inferior (PMP) a partir del cual las raíces encuentran dificultades para extraer el agua, y se produce una disminución de la transpiración que implica pérdidas en la producción. Normalmente se expresa como una fracción del intervalo de Humedad disponible.

UR (Umbral de riego): Porcentaje de la humedad aprovechable por las plantas, que tiene que consumirse antes de que se riegue de nuevo.

WSN(s) (Wireless Sensor Network): Red(es) de sensores inalámbricos cuyos nodos son pequeños dispositivos sensores capaces de tomar medidas sobre determinadas magnitudes y comunicarse vía inalámbrica entre sí o a una central que almacene estos datos.

ADC (Analog to Digital Converter): Conversor análogo digital. Dispositivo electrónico capaz de convertir una entrada analógica de voltaje en un valor binario.

OSI (Opens System Interconnection): Interconexión de sistemas abiertos. Modelo de red descriptivo usado para la definición de arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicaciones.

LR-WPAN (Low Rate - Wireless Personal Area Network): Redes de área local personal de baja velocidad. Protocolo de comunicaciones que trata las necesidades de sistemas con poca transmisión de datos pero vidas útiles muy altas con alimentación limitada de baterías, etc. y una complejidad muy baja.

ZigBee: Conjunto de protocolos extendidos del estándar IEEE 802.15.4 usado en redes de área personal de baja tasa de transmisión de datos como las redes de sensores inalámbricos.

CSMA-CA (Carrier Sense, Multiple Access, Collision Avoidance): Acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones. Protocolo de control de acceso a redes de bajo nivel que permite que múltiples estaciones utilicen un mismo medio de transmisión.

FFD (Full Function Device): Dispositivo de funcionalidad completa. Nodo activo capaz de recibir mensajes en formato 802.15.4 que puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interfaz con el usuario.

RFD (ReducedFunction Device): Dispositivo de funcionalidad reducida. Nodo pasivo que tiene la capacidad y funcionalidad limitadas con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad.

MAC (Media Access Control): Capa de control de acceso al medio. Conjunto de mecanismos y protocolos por los que varios "interlocutores" (dispositivos de una red) se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común (en comunicaciones inalámbricas, rango de frecuencias asignado a su sistema).

API (Application Programming Interface): Interfaz de programación de aplicaciones.

JDK (Java Development Kit): El Kit de desarrollo de Java es un conjunto de herramientas (programas y librerías) que permiten desarrollar (compilar, ejecutar, generar documentación, etc.) programas en lenguaje Java.

IDE (Integrated development environment): Es un entorno de desarrollo integrado usado para facilitar la programación usando un lenguaje de programación específico a través de un ambiente gráfico.

RESUMEN

El presente trabajo es la finalización de una investigación experimental, que consiste en el diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos que monitorean la variable fundamental para controlar el riego por goteo usado en cultivos de fresa. De acuerdo a la investigación realizada, pudieron ser detectados los diferentes requerimientos que debía tener la red, como lo son su forma de transmisión y las variables evaluadas para el control, siendo la variable más importante, la humedad volumétrica del suelo.

La culminación de la investigación se logra gracias a la realización de cinco etapas principales. En la primera se hace una revisión y análisis bibliográfico, que permiten comprender la teoría de humedad en suelos, y la comunicación inalámbrica adecuada. Culminada la primera etapa, se procede a definir el sensor que mejor responda a la variación de la humedad en el suelo y luego se realizan una serie de procesos que sirven para calibrar el sensor, logrando de esta manera conocer las ecuaciones que relacionen la humedad volumétrica con el voltaje entregado por éste.

La tercera etapa se la efectúa con los módulos XBee Pro S2, que funcionan en base al protocolo IEE 802.15.4 usado para aplicaciones que no requieran enviar vía inalámbrica, gran cantidad de información. Además de proporcionar un alcance de hasta 1500 metros, estos módulos poseen pines dedicados a la conversión análoga digital (ADC) que facilitan la adquisición de los datos de humedad entregados por los sensores, para luego ser transmitidos a una estación base. En la estación base, hay un módulo XBee Pro S2 conectado a una tarjeta que hace las veces de un adaptador RS232 a USB, la cual crea un puerto virtual en el computador que permite la recepción de los datos.

En la cuarta etapa, se procesa los datos con la ayuda de un software desarrollado en java, el cual muestra gráficamente el comportamiento de la humedad en el suelo y es capaz de decidir las acciones de control que logren mantener esta humedad en los niveles adecuados para el normal crecimiento y producción de las plantas de fresas. Finalmente, se implementa el sistema completo en el lugar escogido para tal fin, se evalúa el prototipo diseñado y se hacen las respectivas pruebas de funcionamiento, logrando identificar los errores existentes en el software y hardware que se corrigieron para que el sistema trabaje de manera exitosa.

ABSTRACT

This paper is the completion of an experimental research that consist on the design and implementation of a wireless sensor network that monitors the key variable to control the drip irrigation used in the strawberry crops. According to the investigation, it was possible to detect the different requirements that should have the network, which were its transmission and the variables evaluated for the control, being the most important variable the volumetric soil moisture.

The culmination of the research is achieved through the realization of five main stages. The first one, is a review and analysis of the literature, that allow us to understand the theory of soil moisture, and the appropriate wireless communication. With the completion of the first step, we could define the right sensor with the better response to the variation of the moisture in the soil and then make a lot of processes that are used to calibrate the sensor, to finally find the equations that relating the volumetric moisture with the voltage supplying by it.

The third stage is performed with the XBee Pro S2modules, which work based on the IEE 802.15.4 standard, used for applications that don't need to send wirelessly, a great amount of information. Also of provide a range of up to 1500 meters, these modules provide an Analog Digital Conversion that facilitate the acquisition of data supplied by the sensors, after this data are transmitted to a base station. Here, there is a XBee Pro S2 module connected to a card that acts as a USB TO RS232 adapter, which creates a virtual port on the computer that allows the reception of data.

In the fourth stage, the data is processed with the help of software developed in java, which shows graphically the behavior of the soil moisture and it, can decide the control actions that achieve this moisture in the appropriate levels for the normal growth and production of strawberry plants. Finally, the entire system is implemented in the place selected for this project, we evaluate the prototype designed and made the respective function test, achieving identify the mistakes in the software and hardware that were corrected for the system works successfully.

INTRODUCCIÓN

Nariño es una región en la cual la agricultura es la principal fuente económica para sus habitantes. Los agricultores disponen de un amplio territorio que les brinda tierras fértiles donde pueden sembrar gran variedad de productos sin el temor de perder la inversión que están realizando. No obstante, la productividad agrícola es inferior que la de otras zonas del país, debido a la manera tradicional que tienen los agricultores para practicar sus siembras, al carecer de una visión clara de aprovechamiento y cuidado de los recursos naturales de nuestro departamento. Por esto surge la necesidad de comenzar a implementar nuevas tecnologías en el campo, que permitan gestionar de forma eficiente los insumos agrícolas, mejorar la calidad de los productos y mejorar la condición económica del agricultor local.

Entre las prácticas más novedosas que puede impulsar el desarrollo del campo se encuentra la que se conoce como agricultura de precisión, la cual tiene como fin identificar la variabilidad de área cultivable, evaluar su grado de incidencia y tomar medidas para que soporten tales variaciones para mejorar el producto final cosechado. Estas medidas generalmente están relacionados con distribuir los recursos agrícolas de forma sitio específica, dejando atrás el concepto de cultivo homogéneos y brindando a cada porción de suelo la dosis de agua, fertilizante, o plaguicida que solo éste requiera. Esta práctica implica el uso de métodos precisos y controlados dejando atrás las decisiones subjetivas para aplicar los distintos insumos agrícolas que los cultivos necesitan para su óptimo desarrollo.

La presente investigación se plantea como una propuesta para analizar la pertinencia de una práctica agrícola sitio específica enfocada al manejo de riego por goteo, a partir del diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos capaz de medir la variabilidad espacial de humedad del suelo, usando sensores localizados en sitios específicos del terreno. Con esto se busca sentar un precedente para definir la viabilidad de nuevas prácticas agrícolas y contribuir a la conservación de ese líquido preciado que es el agua, que como es sabido, es un recurso natural en vía de extinción.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un prototipo de un sistema de control automático de riego por goteo utilizando redes de sensores inalámbricos, usando como escenario de aplicación la finca APROBORCA ubicada en el corregimiento de Cabrera.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar sensores de humedad de suelo y calibrarlos de acuerdo a las condiciones del área cultivable
- Diseñar una WSN basada en el estándar IEEE 802.15.4 cuyos nodos incluyan como mínimo: sensores de humedad de suelo, electroválvulas, una motobomba, módulos de procesamiento, módulos de comunicación inalámbricos, módulos de alimentación eléctrica y sus respectivas interfaces.
- Diseñar una estación remota capaz de recolectar, desplegar y evaluar los datos enviados por la WSN, para controlar el suministro de agua global a través de una motobomba y el suministro de agua localizado a través de electroválvulas.
- Implementar un prototipo funcional con un bajo número de sensores que demuestre la efectividad de la solución diseñada.
- Realizar pruebas de validación del sistema en el escenario de aplicación escogido.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 AGRICULTURA DE PRECISIÓN

1.1.1 Definición. La agricultura de precisión (AP) se define como un conjunto de técnicas orientadas a administrar de forma eficiente los insumos usados en la producción agrícola a través de la identificación y evaluación de la variabilidad del terreno cultivable.

En contraste con la agricultura tradicional, la agricultura de precisión hace un manejo sitio específico del cultivo. Evita la práctica de una distribución fija y uniforme de insumos pues considera el área productiva, como un conjunto de secciones independientes que demandan necesidades particulares en cuanto a: cantidad de fertilizante, semillas, abono, plaguicidas, agua, entre muchos otros, debido a la variabilidad característica de toda área cultivable. Por esto la AP plantea justamente la variabilidad como el factor esencial a ser reconocido y evaluado durante todo proceso productivo, pues lo considera como la base para definir estrategias que permiten un control eficiente de todos los recursos, y que de asociarlo en la práctica agrícola, puede desencadenar grandes beneficios tales como: incremento en la producción, mejora en la calidad, distribución eficiente de insumos, mejora de ingresos económicos y reducción del impacto ambiental.

No está establecido un número mínimo de variables para la adopción de la AP, en sí, lo importante es seleccionar aquellas que influyen considerablemente el cultivo. La variabilidad del área cultivable suele evidenciarse principalmente en su topografía, fertilidad del suelo, profundidad de suelo, contenido de humedad, textura, incidencia de insectos, recurrencia de enfermedades o cantidad de maleza. Todas estas características pueden generar cambios en el rendimiento y calidad del cultivo y es justamente la labor de la AP identificarlas. Para esto se definen globalmente dos tipos de variabilidad: Variabilidad Espacial y Variabilidad Temporal¹.

- **Variabilidad Espacial.** Es aquella que expresa el cambio de algún parámetro o variable dentro del área cultivable. Estas variables resultan estar relacionadas principalmente con características del suelo tales como su proceso de formación, sus componentes químicos, físicos, biológicos, su manejo histórico y hasta la forma y tamaño del lote.

¹ SAC, Sociedad de agricultores de Colombia. Agricultura de Precisión AP. En: Revista Nacional de Agricultura. Junio, 2007. No 949, p. 24-26.

- **Variabilidad Temporal.** Es aquella que expresa el cambio de algún parámetro o variable que ha ocurrido en el área cultivable entre etapas productivas, de una cosecha a otra, o de un año a otro.

Además de las anteriores suele considerarse también lo que se conoce como Variabilidad Predictiva. Básicamente está relacionada con las diferencias entre lo que el agricultor predice que va a suceder y lo que realmente sucede en cuanto a la producción del cultivo. Esta diferencia surge debido a factores que no son considerados por el agricultor como por ejemplo, cambios en el clima manifestados en lluvias intensas por varios días que pueden conducir a una pérdida en la producción, aún cuando la cantidad de fertilizante aportado fue el adecuado durante todo el proceso.

1.1.2 Clasificación de la variabilidad. Tanto la variabilidad espacial como la temporal están clasificadas en seis grupos².

- **Variabilidad del rendimiento y de campo.** La primera hace referencia a los cambios en el rendimiento de algunas zonas productivas a lo largo de toda el área cultivable ya sea en un momento dado o entre temporadas. La segunda hace referencia a la variabilidad definida por la elevación, pendiente, aspecto, y en sí, a la topografía del área cultivable.
- **Variabilidad del suelo y de cultivos.** La primera hace referencia a cambios relacionados con la fertilidad del suelo; sus propiedades físico-hídricas como contenido de humedad, capacidad de retención de agua, conductividad eléctrica, textura, densidad, resistencia mecánica, profundidad del suelo; y de sus propiedades químicas como pH, materia orgánica, salinidad, entre otras. La segunda hace referencia a los cambios en las propiedades biofísicas que pueden ser cuantificadas como el índice de área foliar (IAF), intercepción de radiación fotosintéticamente activa y la biomasa, contenido de clorofila en la hoja, calidad del producto cosechado. También se incluyen en este tipo de variabilidad aquellos cambios generados por la altura de los cultivos y por su densidad.
- **Variabilidad debida a factores anómalos.** Hace referencia a los cambios generados en el rendimiento y calidad de los cultivos debido a la influencia de factores bióticos o abióticos como: infestación de malezas, plagas de insectos, infestación de enfermedades, daños por el viento, heladas, entre otros. Si bien estos factores pueden ser identificados suelen ser difíciles de controlar.

² LEÓN, Lorenzo. Manejando la Variabilidad. En: Handbook Agricultura de Precisión. Chillán, Chile, 2011. p. 62-64.

- **Variabilidad debida a manejo de cultivos.** Hace referencia a los cambios que surgen en los cultivos por factores como el manejo híbrido, densidad de siembra, rotación de cultivos, aplicación de fertilizantes, aplicación de plaguicidas, patrón de riego, entre otros.

1.1.3 Segmentación del área cultivable. La agricultura tradicional considera el campo productivo como una unidad homogénea cuya necesidad de insumos agrícolas es uniforme y fija. Sin embargo, esta generalización puede resultar en secciones del cultivo con dosis mayores o menores a sus necesidades que pueden desatar inicialmente pérdidas económicas, desperdicio de insumos, bajas en la producción y calidad, degradación del suelo, impacto ambiental y en casos extremos, esterilidad del suelo. Para evitar esta problemática la AP incluye el concepto de *zonas de manejo*, considerando necesario dividir el área cultivable en varias secciones que requieren dosis variables.

Una zona de manejo se define como una porción del área cultivable que presentan características similares en cuanto a su variabilidad espacial y/o temporal, pero que difieren en su comportamiento con otras zonas de un mismo cultivo. El número de zonas de manejo en las que puede dividirse un cultivo no depende solamente de su tamaño sino también del grado de variabilidad que presente³. La delimitación de estas zonas puede cambiar dependiendo del tipo de variable analizada y el insumo asociado a ésta, por tanto el tamaño mínimo de una zona de manejo depende de la capacidad del agricultor para manejar diferencialmente sectores dentro de un mismo cultivo⁴.

1.1.4 Tecnologías asociadas. Siendo la identificación de la variabilidad la clave para delimitar las zonas de manejo y en definitiva, el factor esencial de la AP, resulta lógico asociar esta práctica con el uso de tecnología sofisticada, sin embargo este vínculo no es absolutamente necesario. El uso de tecnología básica como un computador que registra información o incluso información registrada a mano ya implica AP⁵. La aparente simplicidad de recolectar datos de distintas zonas del terreno (contenido de humedad, textura, densidad) o la recolección de información a partir de la observación detallada del agricultor (zonas propensas a inundaciones o sequías, épocas y zonas de mayor o menor producción); no excluyen la posibilidad de determinar el tipo de variabilidad espacial y/o temporal presente en el área cultivable ni mucho menos, de tomar decisiones para distribuir acertadamente los recursos de forma sitio específica.

Aún cuando estas evaluaciones básicas de variabilidad permiten plantear un criterio para definir las zonas de manejo y encajan en el concepto de AP, no

³ LEÓN, Op. Cit., p. 65-68.

⁴ ZHANG, Naiqian, WANG Maohua, WANG Ning. Precision agriculture: a worldwide overview. En: Computers and Electronics in Agriculture. Noviembre, 2002. Vol. 36. p. 113-132.

⁵ SAC, Op. Cit., p. 20-23.

garantizan el nivel de exactitud que si puede brindar el uso de tecnología sofisticada que va desde el uso de robustos algoritmos estadísticos, hasta sistemas de posicionamiento global (GPS) y teledetección. A continuación, se mencionan las principales tecnologías empleadas actualmente en la AP⁶.

- **Sistemas de posicionamiento global (GPS).** Es un sistema de radionavegación satelital diseñado para que un observador pueda determinar cuál es su posición en la Tierra, con una cobertura sobre todo el planeta, las 24 horas del día e independientemente de la condición climática. Para su utilización sólo es necesario contar con un receptor GPS que se caracteriza por su bajo costo. En la AP, suelen utilizarse los llamados GPS diferenciales (DGPS), los cuales usan el método de corrección diferencial para lograr hasta un metro de precisión en el cálculo de coordenadas espaciales. Generalmente para tener acceso a estas señales de corrección se debe pagar un cargo adicional en algunos países ya que pueden provenir de antenas fijas de cobertura limitada⁷.
- **Sistema de información geográfica (SIG).** Es una herramienta de software con capacidad de capturar, procesar, almacenar, manipular y presentar datos geográficamente referenciados con el fin de apoyar la toma de decisiones y el control del campo agrícola. Básicamente un SIG maneja datos cartográficos; estos están contenidos en bases de datos, y se representa visualmente sobre mapas digitales compuestos por varias capas que contienen variedad de información como: características topográficas, datos catastrales, tipo de cultivo, nombre del titular, productividad, rendimientos etc.
- **Sensores.** Estos dispositivos son imprescindibles dentro de la AP, pues permiten obtener información acerca de la variabilidad presente en algún punto del área cultivable que eventualmente puede ser analizada para tomar decisiones oportunas. Actualmente existe una gran variedad de sensores como: sensores de humedad de suelo, sensores de concentración de clorofila, radiómetros, porómetros de hoja; y dispositivos de lectura que incorporan sensores especiales como: medidores de nitratos, medidor de viento, medidor de color de césped, medidor de índice de área foliar, entre otros.

⁶ SEGURA, Luis, TORRES, Sandra, VELEZ, Juana, CORREA, Sandra, VARGAS, Gustavo, PEREZ, Paola. Ejercicio EAD Agricultura de Precisión. Informe de Vigilancia Tecnológica. Santiago de Cali. Universidad del Valle, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Facultad de Ciencias de la Administración, 2010. p. 21-25.

⁷ Disponible en: <<http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/guia-satelital/Banderillero-Satelital-DGPS.asp>>

- **DetECCIÓN REMOTA O TELEDETECCIÓN.** Este tipo de tecnología hace uso de sensores o equipos remotos que no tienen contacto físico con el fenómeno a medir pero que brindan información acerca de la variable indagada. Abarca imágenes multispectrales tomadas por aviones e imágenes tomadas por satélites.
- **Redes de comunicación.** El despliegue de una red de nodos sensores distribuidos a lo largo del área cultivable ó incluso ubicados en maquinaria agrícola, suelen formar una red de comunicaciones flexible y útil para conocer en tiempo real todos los tipos de variabilidad presentes en el proceso agrícola. Esta disponibilidad de información brinda un método preciso y oportuno para tomar decisiones con menor incertidumbre.

1.2 AGUA Y CULTIVOS

1.2.1 Definición. El crecimiento y el desarrollo de cualquier especie vegetal depende indispensablemente de cuatro elementos: Aire, suelo, luz y agua. Cada uno de ellos desempeñan un papel fundamental en el ciclo de cualquier cultivo, sin embargo el agua al ser un recurso agrícola con tendencia a la escasez resulta ser el más significativo. La cantidad de agua que la planta de un cultivo requiere durante todo su ciclo productivo depende del clima, tipo de cultivo y de su etapa actual de crecimiento. De todo este líquido absorbido, aproximadamente el 3% de agua total es conservada por la planta para procesos metabólicos y de fotosíntesis; y el 97% de agua restante es usado para transportar nutrientes desde la raíz hasta la superficie de las hojas donde, finalmente se desprende en forma de vapor de agua⁸.

1.2.2 Importancia del agua en los cultivos. La importancia del agua en los cultivos se debe a que este líquido es aprovechado como un solvente en el que los nutrientes presentes en el suelo agrícola se disuelven para poder ingresar a las células de las plantas a través de sus raíces. Entonces cuando el agua disponible para las plantas no es suficiente, no es posible transportar minerales tan importantes como: hierro, calcio, fósforo, nitrógeno o potasio que yacen en los poros del suelo, pues no hay agua suficiente en la superficie del suelo para disolverlos y conducirlos a través de la planta para que sean metabolizados y aprovechados. Esto trae consecuencias negativas en la calidad y cantidad del producto final, costo de producción y hasta pérdidas de fertilizante pues aunque los nutrientes en el suelo sean abundantes, no pueden ser disueltos para su absorción⁹.

⁸ MUÑOZ, Fernando. Importancia del agua en la nutrición de cultivos. En: Carta Trimestral, Cenicaña. 2009. vol. 31. no. 3 y 4. p. 16-17.

⁹ Ibid., p. 18.

Aún cuando el déficit de agua debe ser evitado, hay también un límite de agua que pueden absorber las plantas de un cultivo. Si este límite es superado las raíces se asfixian y se pudren al carecer de oxígeno generando pérdidas en la producción de un cultivo. Este límite se determina de acuerdo a la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y es la clave para definir la duración de riego en los cultivos.

1.2.3 Suelo y agua retenida. La capacidad que tiene el suelo de retener agua es básicamente una propiedad que depende de su textura, estructura y presencia de materia orgánica. Siendo el suelo un conjunto de partículas de formas variadas no integran una masa compacta sino, más bien una red de pequeños espacios llamados poros que entrelazan todas estas partículas¹⁰.

La textura del suelo hace referencia al tamaño y distribución de una serie de partículas minerales que componen el suelo. Para usos prácticos, las partículas de suelo se conocen como: arena, limo y arcilla. La estructura del suelo hace referencia a la forma en la que se agrupan estas tres partículas individuales, las cuales toman aspectos de partículas mayores denominadas *agregados* con formas de tipo granular, prismática, entre otros. Finalmente la presencia de materia orgánica hace referencia a aquellos restos vegetales y animales que el propio suelo descompone y los transforma en materia rica en variedad de nutrientes.

Para la actividad agrícola el suelo ideal es el denominado *franco* pues al poseer cantidades equilibradas de arcilla, limo y arena, permiten transmitir con mayor facilidad el agua y el aire (permeabilidad); además tiene una estructura que permite una velocidad de infiltración moderada, esto es, que la velocidad con la que el agua penetra al suelo puede ser asimilada y aprovechada. Adicionalmente el contenido de materia orgánica deber ser alto para que aumente el agua retenida por el suelo¹¹.

1.3 HUMEDAD DE SUELO

1.3.1 Definición. El contenido de agua que retiene un suelo en un momento dado se denomina humedad de suelo. Este valor suele expresarse como un porcentaje. Cuando está definido en base a peso se denomina *Humedad Gravimétrica*, cuando está definido en base a volumen se denomina *Humedad Volumétrica* y cuando se expresa como un valor en milímetros se llama *Lámina de Agua*. Todas estas expresiones de humedad requieren para su cálculo distintos

¹⁰ WWF, España. El agua en la agricultura. En: Manual de buenas prácticas de riego. Octubre, 2009. p. 5

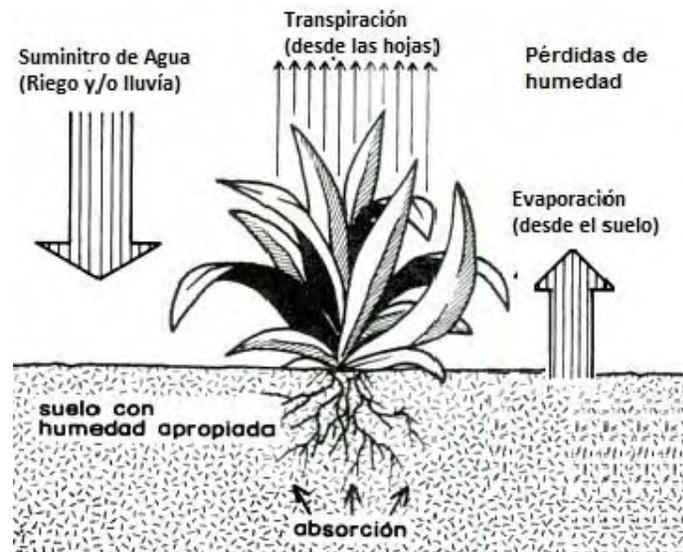
¹¹ Disponible en: < <http://www.mediterraneadeagroquimicos.cat/Informa/suelo.htm>>

procedimientos y se usan para representar los parámetros hídricos que determinan cuándo, cuánto y dónde regar¹².

1.3.2 Pérdidas de humedad. Todos los cultivos necesitan mantener su nivel de humedad en un rango apropiado pues continuamente están perdiendo agua por el efecto denominado *evapotranspiración*. La evapotranspiración es la cantidad de agua que el suelo pierde ya sea como consecuencia de la evaporación del líquido directamente desde la superficie del suelo, o ya sea como consecuencia de la transpiración que emiten las hojas de las plantas hacia la atmósfera. La evaporación y la transpiración son procesos que ocurren de forma simultánea, son interdependientes y es muy difícil medirlos por separado. Los factores que influyen la evapotranspiración son por un lado de tipo meteorológicos, relacionados con la temperatura, humedad relativa e iluminación, y por otro lado de tipo fisiológicos, relacionados con la especie vegetal, edad, desarrollo y profundidad de raíz¹³. La Figura 1 ilustra el proceso de evapotranspiración.

Aunque las necesidades de agua dependen de las pérdidas por evaporación y transpiración, la cantidad de agua necesaria para un cultivo no está limitada al cálculo de estas variantes, pues es factible usar una forma alternativa para detectar los requerimientos hídricos de un cultivo (midiendo el nivel de humedad).

Figura 1. Evapotranspiración en las plantas



¹² ROJAS, Rafael. Relaciones Suelo – Agua. En: Las relaciones agua suelo planta atmósfera en planificación, diseño y manejo de proyectos de aguas y tierras. Centros de estudios forestales y ambientales de postgrado. ULA. Mérida. p. 9

¹³ CHÁVARRI, Eduardo. Evapotranspiración. Curso: Hidrología Aplicada. Lima. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola. Abril, 2004. p. 1-2.

- **Midiendo el nivel de humedad del suelo.** Siendo la humedad un indicativo de la cantidad de agua disponible para el cultivo, puede ser medida de forma indirecta a través de distintos procedimientos o dispositivos que informan en forma porcentual su valor real. A través de procedimientos empíricos, el cálculo del nivel de humedad se lleva a cabo recolectando muestras de suelo y analizándolas minuciosamente en laboratorios especializados. Por otra parte, el uso de dispositivos como sensores o sondas instalados en la zona de raíz del cultivo son útiles para informar el valor de humedad en tiempo real. Para el desarrollo de este trabajo se usa este procedimiento para estimar la necesidad de agua del cultivo elegido y se hace énfasis en este tipo de procedimiento.¹⁴.
- **Calculando la disponibilidad de agua a partir de datos meteorológicos.** Este procedimiento permite calcular directamente las pérdidas por evapotranspiración e implica el cálculo de una serie de parámetros ineludibles como: coeficiente de cultivo, coeficiente de humedad de cultivo y evapotranspiración potencial. Este último parámetro puede ser calculado aplicando muchos métodos que en su mayoría implican factores meteorológicos complejos tales como: radiación neta total, temperatura media diaria, precipitación total anual, aporte del nivel freático, entre muchos otros que exigen un estudio detallado y de alto costo del estado climatológico de la zona de aplicación¹⁵.

1.3.3 Sistema de riego por goteo. Los sistemas de riego son utilizadas para compensar las pérdidas de agua en el cultivo. La forma en la que se aplica el agua al cultivo se denomina *método de riego*, y el conjunto que forma con la infraestructura que lo acompaña se denomina *sistema de riego*. Uno de los métodos más utilizados hoy en día gracias al ahorro de agua que presenta y la uniformidad con la que aplica el agua a la planta es el llamado *riego por goteo*. El riego por goteo es un método de riego localizado que se caracteriza por realizar pequeñas aportaciones de agua de forma continua y frecuente muy cerca a la planta, humedeciendo sólo una fracción del volumen del suelo. Aunque existen varios métodos de riego (por aspersión, por inundación, por drenaje, por infiltración) que suplen las necesidades hídricas de los cultivos, estos deben ser elegidos considerando un gran número de factores que van desde el precio del agua en la localidad del agricultor, hasta la capacidad de retención de agua que tiene cultivo¹⁶. Para desarrollo del presente trabajo, la implementación se llevó a cabo sobre un sistema de riego por goteo parcialmente equipado. A continuación se mencionan sus partes principales:

¹⁴ Disponible en: <<http://www.fao.org>>

¹⁵ Ibid., p. 1

¹⁶ ROMERO, José. Componentes de un sistema de riego por goteo. En: Manual de operación y mantenimiento de un sistema de riego por goteo. 1 Ed.2005. p. 7-8.

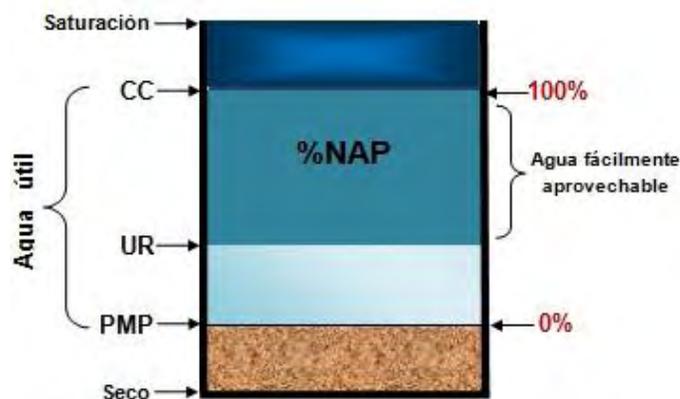
- **Fuente e Impulsador de agua.** La fuente de agua es la encargada de albergar el agua que succiona la fuente impulsadora hacia todo el cultivo. Generalmente es un reservorio, que mantiene el agua o lluvia, o la proveniente de una quebrada cercana aunque puede provenir del acueducto de agua potable. La fuente impulsadora es el elemento encargado de otorgar la presión y el caudal de agua necesarios para abastecer todo el cultivo. Generalmente está conformada por una motobomba con la presión y caudal adecuados. Aunque en la mayoría de casos suele reemplazarse por un estanque elevado sobre el nivel del suelo donde la gravedad es la fuente de presión¹⁷.
- **Cabezal de riego.** Está conformado por una serie de elementos que permiten tratar y filtrar el agua, adicionar fertilizantes y regular la presión del líquido. La unidad de filtrado busca eliminar partículas o sólidos en suspensión que pueden obstruir algún punto de la red de distribución. Los tipos de filtros más usados son: de malla, de arena y de anillas. La Unidad de fertilización suele hacer parte del cabezal cuando los abonos son solubles en agua y pueden ser incorporados al sistema de riego, permitiendo que los nutrientes sean distribuidos a todo el cultivo. Para esto es necesario adicionar dispositivos que impulsen los fertilizantes como tanques de fertilización o inyectores.
- **Red de distribución.** Está formada por las tuberías que transportan el agua previamente filtrada desde el cabezal de riego hasta el punto de emisión de agua. De acuerdo a su posición pueden ser primarias, secundarias y laterales, siendo estas últimas las que distribuyen directamente el agua a la planta por medio de emisores u orificios
- **Emisores de agua.** Son elementos constituidos por orificios que expulsan el agua directamente a las plantas, estos pueden ser goteros, microaspersores o cintas de goteo. En nuestro medio son muy comunes las cintas de goteo, las cuales poseen orificios cada 20cm y se tienden sobre y a lo largo de los surcos del cultivo, haciendo coincidir cada planta con un emisor.
- **Dispositivos de control.** Para este tipo de riego localizado puede existir un mecanismo para garantizar un riego dentro de ciertos límites hídricos. Generalmente son dispositivos de medida que pueden incluir programadores de riego, medidores de humedad de suelo de uso comercial o sistemas más robustos que incluyen algoritmos de control computarizados.

¹⁷ PEREIRA, Luis, VALERO, José, BUENDÍA, María y TARJUELO, José. Riego localizado. En: El riego y sus tecnologías. Marzo, 1 Ed. 2010. p. 229-258.

1.3.4 Parámetros hídricos. Aunque los sistemas de riego permitan compensar las pérdidas de humedad en el cultivo, es necesario conocer hasta qué punto es necesario aplicar el máximo nivel de agua, o hasta qué punto se puede permitir un déficit de la misma. Todos estos límites están contenidos dentro de los parámetros hídricos, los cuales permiten definir mediante un criterio técnico cuándo y durante cuánto tiempo regar. La Figura 2 muestra los parámetros hídricos como niveles de agua presentes en el suelo que van desde un suelo completamente mojado (saturado) hasta un suelo completamente seco.

- **Saturación.** Se considera como la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener contra la fuerza de gravedad, y se ve afectado por el tipo y contenido de arcilla, como también por el tipo de materia orgánica que éste tenga.
- **Capacidad de campo (CC).** Es la cantidad de agua que puede retener el suelo contra la fuerza de gravedad, después de aproximadamente 48 horas de un riego o lluvia abundante que ha saturado el suelo. En este punto, la presión con la que las plantas extraen el agua retenida en el suelo es de aproximadamente 0.3 atmósferas¹⁸.
- **Punto de marchitez permanente (PMP).** Se define como la cantidad de agua del suelo en el que las plantas se marchitan al no ser capaces de aplicar la fuerza de succión necesaria para extraer la poca agua que aún contiene el suelo. En este punto, la presión que aplican las plantas para extraer el agua retenida en el suelo es de aproximadamente 15 atmósferas, un valor muy alto que causa marchitez irreversible.

Figura 2. Parámetros hídricos en el suelo



¹⁸ ENCISO, Juan, PORTER, Dana y PERIES, Xavier. Conceptos básicos. En: Uso de sensores de humedad de suelo para eficientizar el riego. Sistema Universitario Texas A&M, 2007. p. 7.

- **Agua útil.** Es la cantidad de agua que retiene un suelo entre los niveles de capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La CC se considera como el límite superior o 100%, y el PMP se considera el límite inferior o 0%. Generalmente se expresa en milímetros por metros de profundidad de raíz.
- **Agua disponible o aprovechable.** Es la cantidad de agua fácilmente aprovechable y extraíble por las plantas, que no implica aplicar fuerzas de succión que sobrepasen sus capacidades y que les cause daños irreparables.
- **Nivel de agotamiento permisible (NAP).** Es una fracción porcentual de tolerancia que permite calcular el agua disponible para garantizar que la planta no sufra déficit de agua y que el suelo esté suficientemente alejado del PMP. Este porcentaje oscila entre 10% y 60% dependiendo del tipo de cultivo y su tasa de evapotranspiración.
- **Umbral de riego (UR).** Este parámetro define el límite hasta el cual el agua del suelo puede agotarse antes que sea necesario regarlo nuevamente.
- **Seco.** El suelo está seco cuando presenta un déficit extremo de agua, de tal forma que sus poros están llenos de aire y no del agua¹⁹.

1.3.5 Métodos de medición. Para determinar los parámetros hídricos del cultivo que definen el momento oportuno para aplicar riego es necesario medir la humedad del suelo en un momento determinado. Existen una serie de métodos antiguos y modernos que resultan efectivos en su cometido. Hoy en día gracias al desarrollo tecnológico existen una variedad de instrumentos para medir esta variable; en su mayoría, consisten en medir alguna propiedad del suelo que cambia conforme su nivel de humedad.

Los **Métodos directos** son métodos de campo que implican procesos de muestreo y análisis de suelo en laboratorios especializados que contengan hornos de secados a altas temperaturas. Los **Métodos indirectos** también llamado no – destructivos, son métodos que implican establecer relaciones calibradas con alguna otra variable medible. Generalmente integran sensores o sondas ubicadas en el cultivo y acoplados con registradores de datos. Brindan un alto grado de precisión pero requieren una calibración particular para cada cultivo usando como referencia los resultados de un método directo (gravimétrico o volumétrico)²⁰.

¹⁹ WWF, Op. Cit., p. 6

²⁰ MUÑOZ, Rafael y RITTER Axel. Medida de la humedad del suelo. En: Hidrología agroforestal. 2005. p. 127-133

A continuación se exponen los métodos más utilizados:

- **Método gravimétrico y volumétrico.** Es un método directo que se usa como punto de referencia para calibrar otros métodos que incluyen sensores. Consiste en obtener una muestra de suelo, pesarla, secarla en un horno con temperatura de 105°C durante varias horas y pesarla nuevamente. A través de ecuaciones se establece el valor de humedad denominado gravimétrica. El método volumétrico también es usado para calibración, generalmente se toma el valor de la humedad gravimétrica y se la relaciona con el valor de la densidad aparente de la zona muestreada. A través de ecuaciones se establece el valor de humedad denominado volumétrico.
- **Método del tensiómetro.** Es un método indirecto que consiste en medir el esfuerzo que realizan las raíces del cultivo para extraer del suelo la humedad que necesitan. Los instrumentos usados para este fin se llaman tensiómetros y están conformados por una cápsula porosa de cerámica conectada a un tubo provisto de un sensor de vacío llamado manómetro, a medida que el suelo pierde agua la succión aumenta, es decir, el suelo ejerce más fuerza para retener agua. Así, observando cómo varía el valor de la succión se verifica la evolución del agua en el suelo. Por esto, muchas veces los tensiómetros son llamados raíces artificiales.
- **Método de bloques de yeso.** Es un método indirecto que consiste en medir la resistencia eléctrica del suelo a medida que cambia la humedad del mismo. Para realizar esta medición se usa un dispositivo conformado por dos electrodos colocados en dos pequeños bloques de yeso, estos son enterrados en el suelo a distintas profundidades y acoplados a un lector electrónico que determina el valor de la resistencia. Este método no se considera preciso especialmente en cercanías a CC y PMP.
- **TDR (Time Domain Reflectometry).** La reflectometría en el dominio del tiempo es un método indirecto que permite determinar la humedad del suelo calculando su constante dieléctrica, a partir de la medición del tiempo de recorrido de un pulso electromagnético de alta frecuencia que se introduce en el suelo a través de sondas de material inoxidable. La relación es posible pues el agua tiene una constante dieléctrica mucho más alta que la de cualquier suelo, por lo que al calcular la constante dieléctrica total de un suelo húmedo, ésta dependerá principalmente de la cantidad de agua retenida. En la actualidad existen sondas que incorporan este método y se caracterizan por brindar la más alta precisión respecto a otro tipo de sensores, sin embargo no son muy usadas por su elevado costo²¹.

²¹ Ibid., p. 135.

- **FDR (Frequency Domain Reflectometry) y técnica de Capacitancia (FD Frequency Domain).** La reflectometría en el dominio de la frecuencia y la técnica de capacitancia son métodos indirectos que determinan la humedad volumétrica calculando la constante dieléctrica del suelo, a partir de la medición del tiempo de carga de un condensador que usa el suelo como medio dieléctrico. (Los sensores que se usan en esta investigación trabajan bajo la técnica de capacitancia)

1.4 SENSORES DE HUMEDAD DE SUELO 10HS

Los sensores 10HS permiten determinar la humedad volumétrica midiendo la constante dieléctrica del suelo a través de la técnica de capacitancia o dominio de la frecuencia (FD). La compañía estadounidense *Decagon Devices, Inc*, enfocada al desarrollo de tecnología de instrumentación es el fabricante de este dispositivo. La Figura 3 muestra una imagen del sensor.

Figura 3. Sensor 10HS



1.4.1. Especificaciones. Las características principales del sensor 10HS son mostradas en la Tabla 1. El sensor entrega como salida una señal de voltaje análoga proporcional a la humedad volumétrica del suelo. Para obtener la relación humedad – voltaje, el fabricante provee una ecuación de calibración estándar que evalúa el valor de voltaje, y lo transforma en un valor porcentual que representa el contenido volumétrico de agua que tiene el suelo en el que se ha enterrado el sensor. El valor de esta humedad varía en el rango de 0% a 57% y asegura una alta precisión siempre que se siga una cuidadosa instalación y se trabaje sobre suelos minerales.

Tabla 1. Especificaciones del sensor 10HS

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN
Humedad Volumétrica	0 – 57%
Precisión	±3%
Resolución	0.08%
Voltaje de Salida	300 mV – 1250 mV
Voltaje de Alimentación	3 VDC – 15 VDC
Corriente de consumo	12 mA – 15 mA
Temperatura de Operación	0 – 50°C
Tipo de Conector	Plug stereo 3.5 mm
Longitud cable conexión	5 m

1.4.2. Principio de funcionamiento. Los sensores 10HS trabajan bajo la técnica de capacitancia, que mide la constante dieléctrica del suelo, aprovechando los cambios que ésta experimenta cada vez que se introduce agua al terreno. Esta relación puede establecerse puesto que cuando el sensor es enterrado en el suelo, éste simula un capacitor de geometría F , que usa como dieléctrico el suelo que lo rodea. El valor de su capacitancia viene dado por:

Ecuación 1

$$C = \epsilon_0 \epsilon F$$

$$t = RC \ln \left[\frac{V - V_f}{V_i - V_f} \right] \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde ϵ_0 es la permitividad dieléctrica del espacio libre y ϵ la permitividad dieléctrica (constante dieléctrica) del suelo. Cuando el sensor es energizado junto con un oscilador forman un circuito eléctrico donde el capacitor que simula, empieza a cargarse durante un tiempo definido por la Ecuación 2, cuyo valor es usado para calcular el valor de la capacitancia en la Ecuación 1. El valor de R en la Ecuación 2 representa su resistencia en serie, V es el voltaje en el tiempo t , V_i es el voltaje inicial y V_f es el voltaje de alimentación del capacitor. Determinando la capacitancia se obtiene la constante dieléctrica del suelo y consecuentemente, como el agua tiene una constante dieléctrica que es mucho más grande que la de los suelos minerales o el aire, el tiempo de carga t puede ser correlacionado con la

cantidad volumétrica de agua presente en un suelo de acuerdo a relaciones experimentales. Generalmente los sensores que usan la técnica de capacitancia se caracterizan por tener un volumen de sensibilidad muy pequeño que no permite caracterizar la humedad de una zona amplia del terreno, sin embargo, a pesar que el 10HS usa el mismo principio, una de sus ventajas es que su fabricación tuvo como objetivo maximizar el volumen de influencia, que, de acuerdo a ciertas investigaciones cubre el equivalente a un cilindro elíptico de 1160cm^3 .

1.4.3. Calibración. La calibración estándar del sensor usando la ecuación del fabricante puede no resultar precisa si se considera que el valor de la constante dieléctrica del suelo con el que se establece el valor de la humedad, se ve afectada por las características propias de cada terreno (textura, densidad, minerales y salinidad). Por esto el fabricante recomienda realizar una calibración específica para el suelo de aplicación, con el fin obtener medidas de humedad volumétrica de alta precisión similares a los resultados de sondas tipo TDR, que se caracterizan por ser las más confiables en esta área. El método de calibración recomendado incluye: toma de muestras de suelo, medición de humedad por el método gravimétrico, análisis y procesamiento de datos medidos y definición de ecuación de calibración²².

1.5 REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS WSNs

1.5.1 Definición. Una red de sensores inalámbricos (WSN) consiste en un conjunto de dispositivos autónomos (nodos sensores) espacialmente distribuidos, que son capaces de obtener información de su entorno, procesarla localmente y comunicarla a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central de coordinación²³. Sus aplicaciones abarcan diversos campos como entornos industriales, domótica, entornos militares, agricultura o medicina; todo esto gracias a su facilidad de despliegue que resulta de gran utilidad en aquellas áreas remotas e inaccesibles donde se requiera medir en tiempo real cambios en niveles de temperatura, humedad, presión, sonido, vibración, desplazamientos, y otro tipo de variables físicas o ambientales. A continuación se resume brevemente las características principales de una WSN²⁴.

- Son redes escalables pues el número de nodos que las componen puede ser desde unos pocos hasta varios miles. La incorporación y descarte de nodos es un proceso sencillo y transparente.

²² DECAGON, Devices Inc. 10HS Soil Moisture Sensor. En: Operator's Manual Version 1.0. 2008. p. 1-6.

²³ Disponible en: <<http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>>

²⁴ DARGIE, Walteneagus y POELLABAUER, Christian. Motivation for a Network of Wireless Sensor Nodes. En: Fundamentals of Wireless Sensor Networks.Theory and Practice.1 Ed. Reino Unido. 2010. p. 4-7.

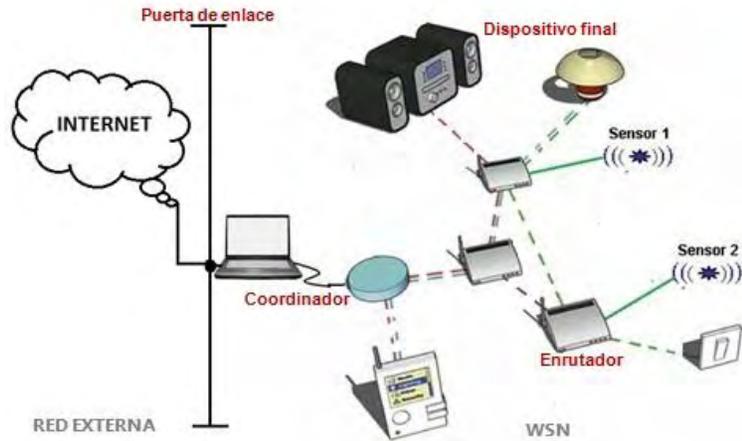
- Son redes auto-configurables lo cual permite que se puedan establecer caminos de comunicación entre nodos sin visibilidad directa y modificar estos caminos si alguno de los que participa en el encaminamiento falla. Para esto principalmente utilizan comunicaciones de tipo multisalto.
- Capacidad de auto-restauración y auto-organización, lo que significa que si un nodo falla, la red encontrará una nueva ruta para encaminar los paquetes de datos. Así, la red seguirá funcionando aunque haya nodos que pierdan potencia o se destruyan. La capacidad de auto-organización, lo que significa que la red actúa de forma autónoma de tal forma que determina sus propios parámetros de configuración como dirección, encaminamiento, indicador de posición, entre otros.
- Son redes caracterizadas por su corto alcance, baja velocidad de transmisión de datos y bajo consumo energético, resultando útiles especialmente en aplicaciones que incluyen ambientes alejados y de difícil acceso a fuentes de energía eléctrica que obligan el uso de baterías.
- Los nodos sensores están limitados en cuanto hardware y software que implican simplicidad de diseño y baja capacidad de procesamiento y memoria. Todo esto para procurar un mínimo consumo energético.
- El costo de producción de los dispositivos que conforma la red se considera normalmente bajo, sin embargo es una consideración relativa que depende del fácil acceso a este tipo de tecnología²⁵.

Las WSN está conformada básicamente por tres elementos que desempeñan un papel particular en la red, estos son: *Nodos sensores*, *Nodo coordinador* y *Puerta de enlace*. Los nodos sensores realizan una serie de mediciones interactuando con el medio, inmediatamente convierten la información medida en formato digital y la transmiten de forma inalámbrica hasta una estación central o nodo coordinador, donde los datos son almacenados y procesados localmente o son enviados a otro tipo de red con mayor capacidad a través de una puerta de enlace²⁶. La Figura 4. Indica un ejemplo de una WSN que recolecta datos de un entorno a través de varios sensores, los procesa localmente a través de un computador y adicionalmente los transfiere a internet. Desde ahí cualquier usuario puede evaluar las condiciones del entorno y controlar remotamente una serie de actuadores de acuerdo a sus necesidades.

²⁵SOHRABY, Kazem, MINOLI, Daniel y ZNATI, Taieb. Introduction and Overview of Wireless Sensor Network. En: Wireless Sensor Networks. Technology, Protocols and Applications.USA. 2007. p.6-9.

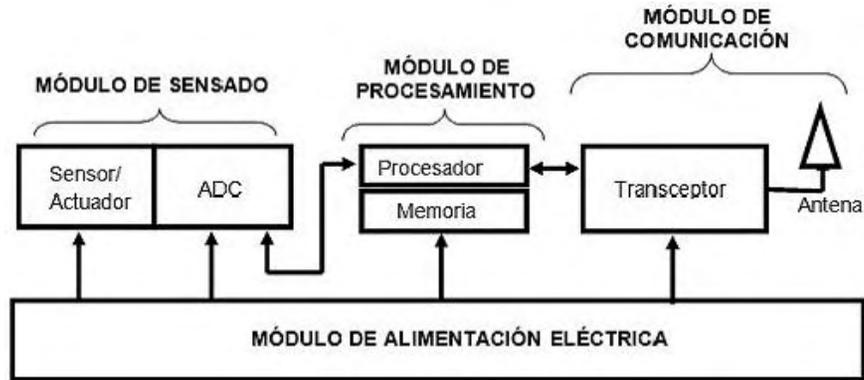
²⁶FERNÁNDEZ, Roberto, ORDIERES, Joaquín, MARTÍNEZ, Francisco, GONZALES, Ana, *et al.* Redes Inalámbricas de sensores. En: Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación. Práctica. España. 2009. p. 18.

Figura 4. Ejemplo de una WSN conectada a Internet



1.5.2 Nodos sensores. La Figura 5 muestra el esquema modular de este tipo de nodo que para efectos de control de procesos, puede incluir actuadores. Son elementos de la red distribuidos espacialmente con la capacidad de captar información del entorno, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro nodo sensor o hacia una estación base.

Figura 5. Módulos de un Nodos Sensor



También denominados “motas” por su reducido tamaño, son los elementos principales en una WSN y suelen estar conformados por cuatro subsistemas o módulos diferenciados como: módulo de sensado, módulo de procesamiento, módulo de comunicación y módulo de alimentación eléctrica²⁷.

²⁷ DARGIE, Op. Cit., p. 47.

- **Módulo de procesamiento.** Es el encargado de interpretar y ejecutar todas las instrucciones que gestionan los procesos de comunicación y de sensado. Entre sus componentes se destacan un chip procesador, memoria no volátil para almacenar instrucciones de programa, memoria volátil para almacenar temporalmente datos de sensores y un reloj interno. Actualmente la mayoría de nodos sensores usan microcontroladores como su elemento central, la razón se justifica puesto que características como bajo consumo energético, bajo costo y capacidades de cómputo moderadas concuerdan con aquellas definidas para el diseño de cualquier WSN.
- **Módulo de sensado.** Es el encargado de detectar o medir los cambios en las variables físicas o ambientales que ocurren en el entorno que está siendo monitoreado. Está conformado por uno o varios sensores físicos, conversores ADC que digitalizan la señal analógica que representa la variable medida y, en algunos casos, se integran mecanismos multiplexores de acuerdo a la densidad de sensores presentes. Adicionalmente estos módulos pueden contener un elemento actuador cuando la red no solamente se usa para monitorear sino para ejecutar acciones de control²⁸.
- **Módulo de comunicaciones.** Es el encargado de enviar y recibir datos de forma inalámbrica para comunicarse con otros dispositivos que estén dentro de la red. Está conformado por un transceptor cuya funcionalidad de transmisión y recepción viene incorporada en el mismo dispositivo. Las bandas de frecuencia utilizadas no tienen requerimientos de licencia y se construyen de tal forma que los niveles de potencia transmitida están dentro de los límites internacionales legales. Su rango de cobertura es de unos cuantos metros y dentro de sus estados de operación incluyen el modo “dormir”, para lograr que la cantidad de energía consumida sea mínima durante los lapsos de tiempo que no haya intercambio de datos.
- **Módulo de alimentación eléctrica.** Es la fuente de energía eléctrica de todos los módulos que conforman un nodo sensor. Pueden ser baterías recargables o no recargables, sistemas basados en energías renovables, aunque también pueden ser reemplazados por transformadores con salidas de voltaje acordes a los requeridos por los módulos; todo esto siempre que se tenga acceso a la red eléctrica a través de un toma corriente cercano. Cabe mencionar que en el momento de la transmisión, los módulos de comunicación son los que más consumen energía, lo cual debe tomarse

²⁸ ILYAS, Mohammad y MAHGOUB, Imad. A Practical Perspective on Wireless Sensor Networks. En: Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems. USA. 2005. p. 177-178.

muy en cuenta cuando se usan baterías como dispositivo de alimentación eléctrica²⁹³⁰.

1.5.3 Estación base o Nodo coordinador. Es un elemento recolector de datos con una alta capacidad de procesamiento que permite gestionar un volumen de datos superior al de los nodos sensores. Este tipo de nodo está basado en un computador común o un sistema empotrado capaz de almacenar, evaluar y desplegar todos los datos provenientes de los nodos sensores con el fin de estudiar o controlar algún proceso. Dada su importancia, este tipo de nodo debe estar conectado permanentemente a una fuente de energía eléctrica de tal forma que el programa que ahí se ejecuta esté siempre coordinando el funcionamiento de la red y sus posibles acciones de control.

1.5.4 Puerta de enlace. Es un nodo especial que actúa como un puente para interconectar la WSN con otra red de datos de diferente naturaleza. Muchas veces es el mismo nodo coordinador y su función radica en conectar las WSNs a infraestructuras de redes existentes tales como Internet, redes de área local e intranet privadas, para que más usuarios puedan acceder a la información remotamente aún cuando sus estaciones manejen protocolos de comunicación distintos³¹.

1.6 ESTÁNDAR IEEE 802.15.4

1.6.1 Definición. El estándar IEEE 802.15.4 es un protocolo de comunicación desarrollado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en el que se apoyan las WSNs para su intercambio de datos. Este estándar construido en base al modelo OSI se considera estándar por ser ampliamente utilizado y por permitir interoperabilidad con otros dispositivos. Su diseño fue contemplado para cubrir las necesidades de redes inalámbricas de área personal donde la velocidad de transferencia sea baja (LR-WPAN), sean de bajo coste y además de bajo consumo de potencia, permitiendo que los nodos de red puedan ser alimentados con baterías no recargables durante largos periodos de tiempo. Así, gracias a las características similares, las WSNs pueden considerarse un tipo de LR-WPAN y por tanto pueden adoptar sus protocolos de comunicación para su funcionamiento³². La Tabla 2 muestra las características principales de este estándar.

²⁹ FERNÁNDEZ, Op. Cit., p. 18-21.

³⁰ DARGIE, Op. Cit., p. 48-61.

³¹ Ibid., p. 23-24.

³² IEEE, Computer Society. Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). Junio, 2011. p. 6.

Tabla 2. Características principales del estándar IEEE 802.15.4

PROPIEDAD	VALOR		
Bandas de Frecuencia	868 MHz	915 MHz	2.4 GHz
Número de canales	1	10	16
Modulación	BPSK	BPSK	O-QPSK
Velocidad de transmisión	20 Kbps	40 Kbps	250 Kbps
Direccionamiento	Corta 16 bits o extendida 64 bits		
Alcance	10 m – 75 m		
Latencia	Por debajo de 15ms		
Canal de acceso	CSMA-CA y CSMA-CA ranurado		
Red	Hasta 65000 nodos		
Topologías	Estrella o malla		

1.6.2 Dispositivos físicos. De acuerdo a la funcionalidad y complejidad del hardware de los nodos, se definen en el estándar IEEE 802.15.4 dos clases de dispositivos físicos: Dispositivos de funcionalidad completa (FFD³³) y Dispositivos de funcionalidad reducida (RFD³⁴).

- **Dispositivos de funcionalidad completa (FFD).** Están dotados de una cantidad de memoria y recursos suficientes y necesarios para ejecutar todas las funciones del estándar, incluso pueden acatar responsabilidades adicionales como la de comunicarse con otras redes. En las aplicaciones suele ser un computador que hace las veces de estación base o nodo coordinador de la red o los enrutadores.
- **Dispositivos de funcionalidad reducida (RFD).** Están dotados de capacidades y funcionalidad limitadas con el fin de conseguir un bajo coste a partir de su simplicidad. En las aplicaciones estos suelen ser los sensores o actuadores presentes en la red³⁵.

1.6.3 Dispositivos lógicos. De acuerdo al rol que los nodos desempeñan en la red y las responsabilidades que se les asigna se definen en el estándar IEEE 802.15.4 tres tipos de dispositivos lógicos: Coordinador, Enrutador y Dispositivo final.

- **Coordinador.** Es un dispositivo FFD único y obligatorio que debe tener la red para que pueda ser definida e inicializada. Para esto establece el canal

³³ Full Function Device.

³⁴ Reduced Function Device.

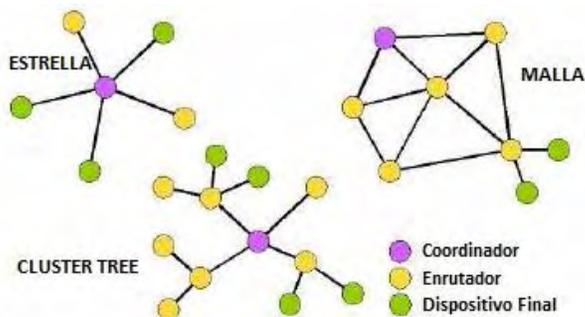
³⁵ ACEDO, Alfredo, MOLINA, María, ORTIGOZA, Ramón. Revisión del proceso de identificación de nodos en las Wireless Sensor Networks. Septiembre, 2008. p. 4.

de comunicaciones y el identificador de red para todos los nodos presentes. Una vez inicializada la red, permite que se unan a la misma los enrutadores y dispositivos finales y puede realizar funciones de enrutador, de tal forma que puede participar en el encaminamiento de paquetes y ser origen y/o destinatario de información. Dada su importancia siempre debe estar activo.

- **Enrutadores.** Son dispositivos FFD que mantienen la información sobre la red. Interconecta los dispositivos que están más alejados del coordinador según la topología de red usada, siempre seleccionando la mejor ruta para transmitir los datos y tienen la capacidad de retransmitir paquetes de otros enrutadores o dispositivos finales. Dependiendo del tamaño y topología de la red pueden no ser implementados.
- **Dispositivos finales.** Son dispositivos RFD que no pueden retransmitir datos a otros destinatarios. Deben interactuar siempre a través de su nodo padre, ya sea este un Coordinador o un enrutador y por tanto no pueden comunicarse directamente entre sí. Dada su función pueden reducir el consumo de energía de la red pues no es necesario que permanezcan activos todo el tiempo³⁶.

1.6.4 Topologías. La Figura 6 ilustra las topologías con la distribución de los dispositivos de red que, siempre incluyen un único coordinador por red.

Figura 6. Topologías definidas en el estándar IEEE 802.15.4



Dependiendo de los requerimientos de la aplicación que se vaya a desarrollar puede ser elegida una de dos topologías definidas en el estándar IEEE 802.15.4: Topología en estrella y topología Cluster Tree. Cuando la aplicación lo amerita y se necesite un rango de cobertura mayor al soportado por dichas topologías, se puede configurar la conexión de los nodos siguiendo la topología malla que resulta ser mucho más fiable y suele considerarse parte de este estándar.

³⁶ ACEDO, Op. Cit., p. 4.

- **Topología en estrella.** En este tipo de topología todos los dispositivos de la red solamente pueden comunicarse con el nodo coordinador. Está formado por varios dispositivos finales (hasta 65536) y un único nodo coordinador centralizado que inicializa la red y encamina los datos. Cada dispositivo final mantienen una sola trayectoria de comunicación directa con el coordinador, y no se puede comunicar con otros dispositivos finales. Aún cuando en ciertas aplicaciones no sea necesario el intercambio de información entre dispositivos finales, pueden intercambiar datos enviándolos primeramente al coordinador quién, una vez los recibe, se encarga de despacharlos a la dirección de destino que le fue indicada. Al ser una topología centralizada es más simple pero debido a sus características resulta práctica en áreas pequeñas donde el número de nodos desplegados sea reducido.
- **Topología Cluster Tree.** Este tipo de topología es una versión extendida de la topología en estrella pues permite aumentar la cobertura, formando varios arreglos tipo estrella usando como nodos centrales dispositivos enrutadores, que a su vez tienen una trayectoria de comunicación directa con el nodo coordinador. Los enrutadores hacen las veces de coordinadores locales capaces de encaminar y direccionar los datos de varios dispositivos finales que están a su cargo. De esta forma cada nodo de la red puede comunicarse directamente con cualquier otro siempre que estos se encuentre lo suficientemente cerca como para establecer un vínculo de comunicación. Así, entre más enrutadores hayan desplegados en la red, mayor será su cobertura, sin embargo, si uno de estos dispositivos falla, saldrían de funcionamiento todos los dispositivos asociados a él al no haber más rutas disponibles.
- **Topología en malla.** En este tipo de topología los dispositivos mantienen múltiples trayectorias de comunicación hacia el nodo coordinador, así si el nodo enrutador falla, se elige automáticamente un camino alternativo para encaminar los datos nuevamente hasta su destino final. Todos los dispositivos de red están presentes en este tipo de topología y tanto el coordinador como los enrutadores deben estar activos todo el tiempo. Gracias a la redundancia de trayectorias de comunicación, el sistema es muy confiable y puede cubrir áreas extensas desplegando un gran número de nodos; sin embargo la latencia de la red (retardos) sufren un incremento considerable ya que los datos deben hacer múltiples saltos antes de llegar a su destino final³⁷.

1.6.5 Arquitectura. El estándar IEEE 802.15.4 orientado a las WSNs está definido por una estructura de capas, como se muestra en la Figura 7, que toma como referencia el modelo OSI. Aún cuando este modelo define siete capas, el

³⁷IEEE, Op. Cit., p. 7-9.

estándar estudiado define dos de ellas: Capa física y Subcapa de control de acceso al medio (MAC³⁸).

Figura 7. Capas del Estándar IEEE 802.15.4 asociadas al modelo OSI

<u>Modelo OSI</u>	<u>Modelo OSI simplificado</u>	<u>Modelo IEEE802.15.4</u>
Aplicación	Aplicación de usuario	Capas superiores
Presentación	Perfil de aplicación	
Sesión		
Transporte		
Red	Red	
Enlace	Enlace	MAC
Física	Física	Física

- **Capa física.** Es la encargada de proporcionar el servicio de transmisión de datos sobre el medio físico propiamente dicho a través de la ejecución de una serie de tareas. Esta capa es responsable de seleccionar la frecuencia de operación, detectar la señal, realizar la modulación y generar la señal de transmisión. Igualmente se encarga de controlar el radio transceptor para que entre en modo de recepción, transmisión o dormido (de acuerdo a su rol en la red); estimar el nivel de la señal recibida a través de medidas de calidad del enlace y sintonizar el transceptor en el canal especificado. En la Figura 8 se muestra la distribución de canales para las bandas ISM usadas en el estándar.

El estándar opera sobre las bandas libres de frecuencia reservadas internacionalmente para uso en áreas de tipo industrial, científica y médica (ISM³⁹). Particularmente, en la banda ISM de 2.4 GHz se definen hasta 16 canales, cada uno con un ancho de banda de 2MHz espaciados cada 3 MHz. Se utilizan la técnica de espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS⁴⁰), lográndose tasas de transmisión de hasta 250 Kbps en rangos de cobertura que oscilan entre los 10 y 75 metros, dependiendo de las condiciones del entorno. La Tabla 3 muestra características más detalladas de las bandas de operación.

³⁸ Media Access Control.

³⁹ Industrial, Scientific and Medical.

⁴⁰ Direct Sequence Spread Spectrum

Figura 8. Bandas de operación del Estándar IEEE 802.15.4

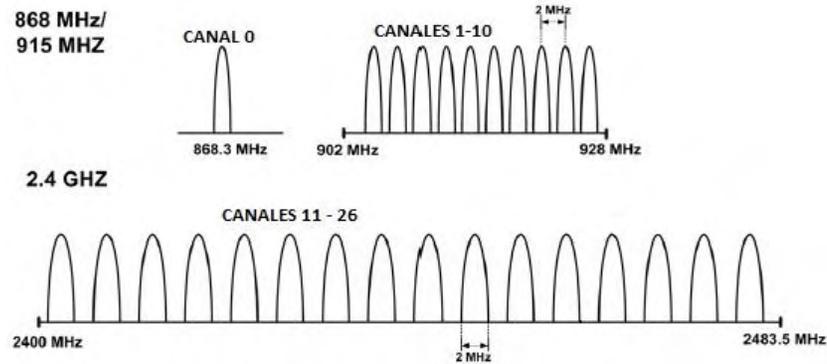


Tabla 3. Parámetros de bandas de frecuencia

Banda de Frecuencia	Parámetros de DSSS		Parámetros de Datos		
	Velocidad de chip (Kchip/s)	Modulación	Velocidad de bit (Kbps)	Velocidad de símbolo	Símbolos
868 MHz	300	BPSK	20	20	Binario
915 MHz	600	BPSK	40	40	Binario
2.4 GHz	2000	O-QPSK	250	250	16-Arreglo

- **Capa MAC.** Técnicamente esta es una subcapa de la capa de enlace de datos de acuerdo al modelo OSI. Está encargada de proveer una interfaz entre la capa física y las capas más altas de protocolos que puedan incorporarse eventualmente. Entre las tareas específicas de esta subcapa están: la transmisión de tramas MAC a través del canal físico, regular el acceso al canal, realizar validación de tramas, entrega de tramas de confirmación, controlar las asociaciones y disociaciones de nodos de red, garantizar las ranuras o slots de tiempo y generar y sincronizar balizas.

Los modos de operación definidos en esta subcapa pueden ser con balizas o sin balizas. En el modo de operación con balizas, el nodo coordinador organiza y envía tramas periódicamente para sincronizar todos los dispositivos de la red. En este modo, cada nodo de la red “despierta” durante un lapso de tiempo para escuchar el envío de mensajes por parte del coordinador; si el mensaje lleva la dirección de destino de algún nodo, éste lo acepta y regresa a modo de mínimo consumo de energía (dormido), si por el contrario no hay datos disponibles para él, los pasa por alto y vuelve a “dormir”. En general, en las redes con balizas, los nodos sólo necesitan estar despiertos cuando transmite datos al coordinador y mientras el coordinador transmite mensaje.

En el modo sin balizas, los dispositivos de la red pueden enviar sus datos usando un mecanismo de control de acceso al canal llamado: acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones (CSMA-CA⁴¹). De esta forma, el nodo que pretende transmitir permanece escuchando el canal, verificando si algún nodo que compone la red está transmitiendo o tiene intención de hacerlo, si no hay tráfico en el canal, la transmisión se hará pasado un cierto instante de tiempo; en caso de existir tráfico, deberá esperar un lapso de tiempo para efectuar el envío de datos. El consumo de energía en este caso, depende de cada dispositivo pues habrán nodos activos permanentemente, (enrutadores y coordinador) y otros que sólo lo están esporádicamente ante la presencia de un estímulo externo (dispositivos finales)⁴².

1.7 ZIGBEE

1.7.1 Definición. Se define como un conjunto de protocolos que amplía el estándar IEEE 802.15.4 definiendo capas superiores que establecen una pila de cuatro capas, para lograr una comunicación sencilla y eficiente entre los nodos de una WSN. La iniciativa de esta extensión es mérito de ZigBee Alliance; una alianza liderada por empresas como Texas Instruments, Philips, y Freescale, como una respuesta para cubrir aquellas aplicaciones de monitoreo y control en diversos sectores a partir de redes inalámbricas seguras, con baja tasa de transmisión de datos y mínimo consumo energético.

Además de contar con la capa física y la subcapa MAC siguiendo los parámetros del estándar IEEE 802.15.4, agrega capas para gestionar las tareas de encaminamiento de datos y mantenimiento de nodos, y maneja entornos de aplicación para establecer interfaces entre los dispositivos de ZigBee y los usados por el diseñador garantizando interoperabilidad⁴³.

1.7.2 Dispositivos y Topologías. Los dispositivos definidos en ZigBee tienen la misma función que los expuestos en el estándar IEEE 802.15.4 En el caso de los dispositivos físicos los nombres son los mismos FFD y RFD. En el caso de los dispositivos lógicos sus nombres incluyen la palabra ZigBee así: Coordinador ZigBee (ZC), Enrutador ZigBee (ZR) y Dispositivo final ZigBee (ZED). Por otra parte, las topologías soportadas por ZigBee son las mismas del estándar IEEE 802.15.4 que ya fueron definidas. Topología en estrella, topología Cluster Tree y oficialmente topología en malla⁴⁴.

⁴¹ Carrier Sense, Multiple Access, Collision Avoidance

⁴² IEEE, Op. Cit., p. 10-14.

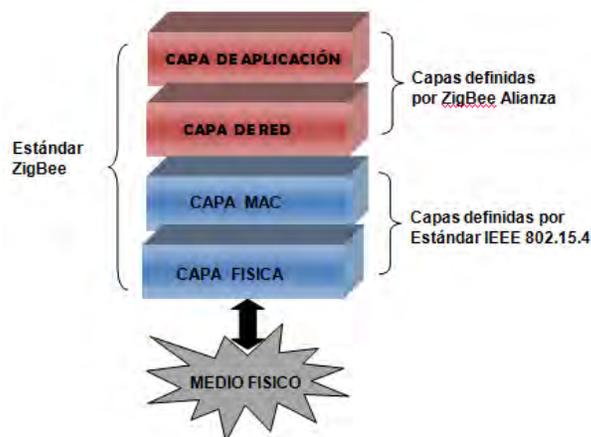
⁴³ SUÁRES, Pablo. Reducción del consumo de energía del protocolo ZigBee implementando un protocolo MAC de bajo consumo. Trabajo de Grado. Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros. 2008. p. 7.

⁴⁴ Ibid., p. 8-9.

1.7.3 Arquitectura. La arquitectura ZigBee consta básicamente de cuatro capas, como se muestran en la Figura 9, dos de ellas heredadas del estándar IEEE 802.15.4 que ya fueron definidas y dos adicionales que son: la capa de red y la capa de aplicación. A toda esta pila de protocolos es común encontrarla bajo el nombre de Estándar ZigBee.

- **Capa de red.** En esta capa se brindan los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes hacia a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos. Cuando esta capa cumple la función de unir o separar dispositivos a través del controlador de red, implementa seguridad, y encamina tramas a sus respectivos destinos. En esta capa es donde se implementan las topología de red que ZigBee soporta que son las ya mencionadas en el estándar IEEE 802.15.4.
- **Capa de aplicación.** Esta es responsable de proporcionar la interfaz efectiva entre el nodo ZigBee y sus usuarios. Está encargada de definir el rol que el nodo juega en la red ya sea Coordinador, enrutador o dispositivo final. También se encarga de filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red⁴⁵.

Figura 9. Estándar ZigBee



1.7.4 Aplicaciones ZigBee en WSNs. Sus aplicaciones abarcan aquellas áreas en donde sea requerido desplegar un conjunto de nodos para monitorear variables y/o controlar procesos. Campos como la domótica, medicina y procesos

⁴⁵ MORENO, Javier y RUÍZ Daniel. Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4). España. Junio, 2007. p.8-20.

industriales son compatibles con esta tecnología. A continuación se menciona brevemente algunas aplicaciones que incluyen las WSN.

- **Monitoreo ambiental.** Los sensores son usados para monitorear la calidad del aire, el nivel de polución, detectar amenazas biológicas a partir de dispositivos de baja escala. Además, pueden monitorear condiciones y movimientos de entes como animales, evitando la presencia de personas que perturben su ambiente de desarrollo natural. Entre las investigaciones más novedosas se encuentra el monitoreo de glaciares que, a partir de una WSN, se logran conocer sus desplazamientos y sus cambios de temperatura. Estos datos resultan valiosos pues fortalecen los conocimientos acerca del cambio climático.
- **Control de pacientes.** Una WSN puede usarse para supervisar los signos vitales en pacientes con enfermedades crónicas, generalmente cardiopatías donde se requiere vigilar continuamente la presión sanguínea, saturación de oxígeno en la sangre o pulsación cardiaca. En este campo las redes se conocen específicamente como redes de sensores corporales.
- **Edificios inteligentes.** Se pueden desplegar nodos sensores en todo un edificio que a través de un monitoreo continuo, alerten ante la presencia de humo, intrusos o niveles de dióxido de carbono que eviten potenciales incendios. Adicionalmente se pueden adaptar una serie de actuadores que mediante la información recolectada por la WSN, regulen variables como: el nivel de iluminación, el acceso de personas, el riego del jardín y hasta el encendido o apagado de electrodomésticos.
- **Control de procesos industriales.** Las aplicaciones industriales incluyen telemetría de cultivos, pérdidas de calidad, diagnóstico de maquinaria, monitoreo de variables, entre otros. Una WSN puede usarse para monitorear máquinas de grandes proporciones y mantener informado al usuario sobre nuevas fallas en cuanto a componentes como: motores, cilindros rotativos y demás. Los datos recolectados por la WSN pueden ser el indicativo de que la máquina sufre de algún tipo de desgaste y que necesita mantenimiento⁴⁶.

1.8 MÓDULOS XBEE – SERIES 1, SERIES 2 y PRO

Son dispositivos fabricados por *Digi International*, que proveen una comunicación inalámbrica usando protocolos basados en el estándar IEEE 802.15.4. Actualmente son muy utilizados en aplicaciones que involucren WSN's ya que además de actuar como transceptor (transmisor/receptor), integran una unidad de procesamiento que brinda funcionalidades adicionales (ADC, I/O digitales y

⁴⁶FERNÁNDEZ, Op. Cit., p. 33-40.

análogas), que permiten desarrollar aplicaciones con la mínima configuración. El fabricante ofrece dos líneas: *Series 1* y *Series 2*, que tienen un hardware similar pero requieren de un firmware distinto que no permite que sean compatibles en una misma red. La Tabla 4 contrasta las características de estos módulos.

Tabla 4. Diferencias módulos XBee Series 1, Series 2 y PRO

Característica	XBee Series 1 (S1)	XBee Series 2 (S2)	PRO S1/S2
Alcance Indoor/ outdoor con línea de vista	30 m / 100 m	40 m / 120 m	(60 m /750 m) / (60 m/1500 m)
Topología	Punto a punto Estrella	Punto a punto Estrella Malla	Punto a punto Estrella Malla
Velocidad	250 Kbps	250 Kbps	250 Kbps
Sensibilidad	-92 dBm	-98dBm	-100dbm / -102dBm
Voltaje DC	2.8 V – 3.4 V	2.8 V – 3.6 V	(2.8 V – 3.4 V) / (3 V/3.4 V)
Corriente de Transmisión	50mA (@3.3V)	40mA (@3.3V)	55mA (@3.3 V) / 45 mA (@3.3 V)
Frecuencia	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Antena	PCB, Integrada, UFL, RPSMA	PCB, Integrada, UFL, RPSMA	PCB, Integrada, UFL, RPSMA
Canales (DSSS)	16	16	12 / 14
Firmware	802.15.4, DigiMesh ⁴⁷	ZNet2.5, ZB (ZigBee)	802.15.4 / ZB
I/O Digitales	8	11	8/8
ADC (Entradas Análogas)	7	4	4/4

Esto se debe a que cada serie está fabricada con un chipset distinto diseñado para una pila de protocolos particular; para el caso de las Series 1 trabaja netamente con el estándar IEEE 802.15.4 y las Series 2 con la pila de protocolos ZigBee. Por esta razón la Series 1 sólo permiten formar redes punto a punto y punto a multipunto (estrella), y las Series 2 facilita, además, la construcción de redes tipo malla o peer to peer. Adicionalmente las dos series presentan la denominación “*PRO*”, lo cual sólo hace referencia a una máxima cobertura que, con línea de vista sobrepasa un kilómetro de distancia haciendo uso de una mayor potencia⁴⁸.

⁴⁷ Ya no es actualizado por el fabricante y los módulos más recientes no lo reconocen.

⁴⁸ FALUDI, Robert. Getting Ready En: Building Wireless Sensor Networks. USA. 2010. p. 1-5.

1.8.1 Modos de operación y modos de comunicación. Los Modos de Operación básicamente son cuatro. El *Modo Reposo* que es el estado de operación por defecto. El *Modo Recepción/Transmisión* ocurre automáticamente cuando al módulo le llega algún paquete RF a través de su antena o a través de su unidad serial (UART) para luego ser transmitida. El *Modo Sleep* que es el estado de bajo consumo de energía. Y por último el *Modo Comando*, que habilita en el módulo el reconocimiento de comandos AT para modificar parámetros de configuración. Dentro de los Modos de Comunicación se encuentran el *Modo transparente* y el *Modo API*. El primero se denomina transparente porque el módulo simplemente pasa la información exactamente como la recibió; se usa para establecer comunicaciones punto a punto simulando una línea serial (es el modo por defecto). En el *Modo API* todos los datos que entran y salen son en tramas estructuradas que definen operaciones y eventos dentro del módulo.

1.8.2 Tramas API. La Figura 10 muestra la estructura general de toda trama API. El uso de tramas API resulta siempre ser más eficiente que el modo transparente pues el módulo actúa sin consumir tantos recursos. Las ventajas de su uso son:

- Permite transmitir información a múltiples destinatarios sin entrar a modo comando
- Recibir estado de éxito/fallo de cada paquete RF transmitido
- Identificar la dirección de origen de cada paquete recibido.
- Permite enviar comandos para configurar módulos remotos y locales.
- Permite obtener los datos (muestras) del ADC de un módulo remoto (En modo transparente no se puede realizar un muestreo remoto)

Figura 10. Trama API - Estructura general



MSB = Most Significant Byte, LSB = Least Significant Byte

Aunque todas las tramas mantienen la estructura de la Figura 10, existen más de 15 tramas API distintas dependiendo de la estructura de la subtrama “Trama de Datos”. Dependiendo de la aplicación, hay una trama de envío de comandos AT para configurar un módulo local, otra para configurar un módulo remoto, para leer muestras del ACD de un módulo remoto, entre otros. La Tabla 5 muestra el tipo de tramas API más usados⁴⁹.

⁴⁹ DIGI, International Inc. API Operation. En XBee/XBee PRO ZB RF Modules. 2012. p. 98-120.

1.8.3 Configuración. Todos los módulos XBee poseen un microcontrolador interno que corre un programa principal denominado firmware. Éste viene cargado desde fábrica con una configuración predeterminada que permite el funcionamiento de cualquier módulo XBee mediante una configuración básica.

Tabla 5. Tramas API más usadas

NOMBRE DE TRAMA API	APLICACIÓN
AT Command	Enviar comandos AT para configurar módulos locales o solicitar el estado actual de algún comando AT
Remote AT Command Request	Enviar comandos AT para configurar parámetros de un módulo remoto.
ZigBee Transmit Request	Enviar un paquetes de datos RF (<84 Bytes) a un módulo remoto.
ZigBee Recieve Packet	Permite reconocer la dirección y el tipo de dispositivo de red que envió un paquete de datos RF
ZigBee I/O Data Sample Rx Indicator	Permite reconocer los cambios en las entradas análogas (ADC) y digitales de un módulo remoto.

Esta configuración puede ser modificada y adecuada de acuerdo a la aplicación que se desee implementar, algunas de las opciones configurables incluyen cosas como: Dirección del módulo destino, habilitación de entradas análogas como ADC, habilitación de entradas o salidas digitales en alto o en bajo, entre otros. Para efectuar estos cambios es necesario usar la unidad *UART* que viene incorporada en todo módulo XBee, y un software adicional que permita el intercambio de datos en forma serial y que sea diseñado para ser compatible con el firmware del módulo.

El software usado para configurar de forma sencilla y rápida cualquier XBee es el *XCT-U*; éste además de cargar configuraciones específicas y actualizar el firmware, permite realizar pruebas de enlaces punto a punto en modo transparente, habilitar configuraciones con comandos AT en modo comando, en modo API permite construir, recibir y enviar tramas estructuradas en formato hexadecimal, restaurar parámetros del módulo a estado de fábrica, entre otros. Para que todo esto sea posible es necesario usar un hardware que acople la unidad *UART* del XBee con el puerto serial del computador, para esto suele usarse un adaptador USB denominada *XBee Explorer* que se conecta al puerto serial del computador y permite la conexión directa entre el *XCT-U* y el XBee para que el intercambio de datos sea efectivo⁵⁰.

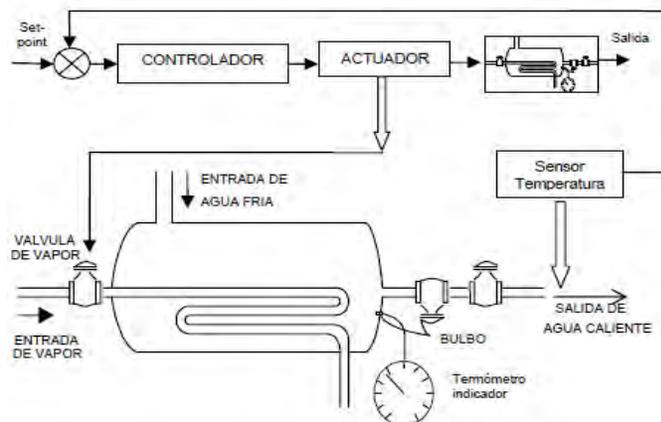
⁵⁰ FALUDI, Op. Cit., p. 7-21.

Aunque el XCT-U es obligatorio cuando se desea actualizar el firmware, sus demás funcionalidades solo son recomendadas principalmente para establecer comunicaciones punto a punto, familiarizarse con el set de comandos AT y la estructura de los distintos tipos de tramas API. Para desarrollar aplicaciones en las cuales se usen varios módulos XBee para formar redes con topologías complejas es necesario desarrollar programas en lenguajes de alto nivel como Visual Basic, C++, Java o en desarrolladores de algoritmos como Matlab o Labview que permitan tener un control mayor de todos los elementos de red y logren realizar configuraciones en forma automática y transparente a través de interfaces gráficas acordes con la aplicación.

1.9 CONTROL ON OFF CON HISTÉRESIS

1.9.1 Acciones de control. De acuerdo a las aplicaciones asociadas a las WSNs, es importante destacar que aunque su nombre únicamente hace alusión al uso de sensores, la mayoría de veces estas involucran actuadores que ejecutan acciones de control realimentado. En la figura 11 se muestran los elementos que interactúan en un sistema de control.

Figura 11. Ejemplo de sistema de control



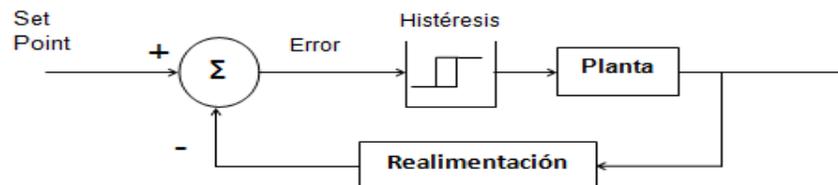
Cuando este es el caso, es necesario incluir elementos adicionales denominados controladores, que son capaces de producir señales que alteran el estado de actuadores para reducir la diferencia entre el valor de la variable medida y un valor de referencia preestablecido como condición ideal de funcionamiento denominado Set Point. La forma en la que el controlador efectúa la señal de control se denomina *acción de control*, siendo las más básicas: *ON – OFF*, *Proporcional*, *Integral* y *Derivativo*. La acción de control *ON – OFF* resulta ser la más simple de todas pues presenta sólo dos posiciones fijas que en la mayoría de casos son

encendido y apagado (todo o nada). Para su implementación suele requerir costos mínimos lo cual la hace popular en aplicaciones industriales y domésticas⁵¹.

1.9.2 Banda de histéresis. La acción de control ON -OFF implica que los actuadores cambien su estado una y otra vez para mantener el Set Point. Este continuo cambio produce un desgaste excesivo en los contactos internos de los dispositivos actuadores, lo cual reduce su vida útil y genera mayores gastos en el consumidor. En consecuencia, para evitar estos inconvenientes se implementa un control ON-OFF con histéresis, en el cual se definen dos valores por encima y por debajo del valor de referencia que definan los dos posibles estados del actuador. Estos valores serán los límites de la banda de histéresis y deben ser definidos en un rango prudente y preciso, para evitar que los actuadores tarden mucho tiempo en encender o apagar, o por el contrario lo hagan de manera frecuente.

Cuando el valor de la variable evaluada se encuentra dentro de la banda de histéresis, los actuadores permanecerán en su estado presente, evitando una conmutación continua ante la mínima fluctuación. Así, solamente cuando el valor de la variable haya alcanzado algún extremo de la banda el actuador cambiará de estado, eso sí, siempre que su estado presente no coincida con su estado futuro. Un caso típico de esta acción de control es el control automático de nivel de líquido en sistemas de almacenamiento de agua caseros donde se acciona la bomba cuando el nivel en el recipiente cae al 50% y se apaga cuando se alcanza cerca del 100%⁵². En la figura 12 se muestran los elementos de este control.

Figura 12. Efecto de la banda de histéresis



1.10 ANTECEDENTES

En distintas instituciones de educación superior han sido desarrollados una serie de proyectos innovadores, con el afán de tecnificar el campo a través del monitoreo y control de algunas variables ambientales. A continuación se hace una descripción general de trabajos recientes que utilizan comunicación inalámbrica para lograr sus objetivos primarios.

⁵¹ OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Traducido por Miguel Ángel Martínez Ramírez. 3 Ed. México. 1998. p. 212-213.

⁵² Ibid., p. 214.

- **Sistema de control de humedad y temperatura para control de invernaderos.** En la universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Colombia, fue realizado un sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos. El sistema consta de un módulo de control, módulos de sensores y módulos actuadores. Para la comunicación entre todos ellos también son usados módulos inalámbricos que permiten un funcionamiento flexible y conjunto del sistema. En este caso los módulos de sensores miden humedad y temperatura, estos datos son enviados al módulo de control, donde son almacenados y mostrados en una interfaz grafica donde el usuario decide si es preciso ordenar el envío de señales de activación/desactivación a los módulos actuadores, para que regulen el funcionamiento de ventiladores, electroválvulas, calefactores y similares que mantengan el invernadero en un ambiente propicio⁵³.
- **Automatización de sistema de riego para el cultivo de flores tipo exportación.** En la Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, fue realizado un sistema automático de riego para un invernadero de flores. El sistema como tal, consta de un módulo de estación remota y un módulo de control. El primero, está encargado de activar a distancia la apertura y cierre de electroválvulas según el horario de riego programado por un operario. El segundo, está encargado de sensar la humedad del suelo y transmitir esa información a la estación remota, donde el operario pueda visualizarla y tomar decisiones de programación de riego. El intercambio de datos es logrado a través de módulos RF incorporados en cada uno de los módulos mencionados mediante una comunicación punto a punto. El sistema actúa automáticamente si es detectado un nivel de humedad muy bajo, activando las electroválvulas durante dos minutos independientemente del horario programado⁵⁴.
- **Sistema Inalámbrico para la supervisión de las variables ambientales de un invernadero.** En la Universidad del Quindío, Colombia, fue realizado un Sistema Inalámbrico para la supervisión de variables ambientales en un invernadero. Las variables monitoreadas son temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, donde la última es usada para activar automáticamente el sistema de riego. Las señales ambientales son adquiridas a partir de nueve sensores distribuidos en el campo, de los cuales solo uno está destinado a medir la humedad del suelo. Estas mediciones son transmitidas de forma inalámbrica a una estación remota, provista de un computador personal que permite el almacenamiento de datos y su visualización a través de una interfaz grafica que muestra la

⁵³ HERNÁNDEZ, Libardo, PINEDA, William y BAYONA, Dariel. Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos. En: Universidad Pedagógica y Tecnológica y de Colombia. 2009

⁵⁴ AGUDELO, Rodolfo, CASTELLANOS Giovanini y MEDINA, Mauricio. Automatización de sistema de riego para el cultivo de flores tipo exportación. En: Pontificia Universidad Javeriana. 2005.

medición hecha por cada sensor y el nivel general de las variables ambientales dentro del invernadero⁵⁵

- **Diseño inalámbrico de un sistema de riego de bajo costo usando tecnología ZigBee.** La Universidad de Zhejiang, China, desarrollaron un sistema de riego inteligente, que al usar el estándar de comunicación inalámbrica ZigBee, reduce notablemente el consumo de energía de todo el sistema y el coste de su implementación. El sistema lo conforma un controlador portátil, un sensor y muchos actuadores (electroválvulas, bombas de agua), que al comunicarse entre si de forma inalámbrica, forman una red en donde cada elemento es reconocido como un nodo y desempeña un papel, siguiendo los protocolos definidos en ZigBee. En la red el nodo sensor, adquiere datos de temperatura y humedad. Estos datos son enviados de forma inalámbrica al controlador portátil. Los nodos actuadores son usados para controlar las bombas de agua y las electroválvulas, estos solo suministran el agua de riego, cuando reciben las órdenes vía inalámbrica desde el controlador portátil⁵⁶.
- **Diseño red de sensores inalámbrica para agricultura de precisión.** En la Universidad politécnica de Cartagena, España, desarrollaron el diseño de una red de sensores inalámbrica para agricultura de precisión, con el objeto de brindar al agricultor, información detallada y en tiempo real de las necesidades del cultivo. El diseño está compuesto por dos redes de sensores inalámbricas y un sensor inalámbrico aislado. La primera red está destinada a medir características del suelo; la segunda red mide temperatura y humedad; y el objetivo del sensor inalámbrico aislado es medir la calidad de agua de riego. Todos estos datos adquiridos son transmitidos bajo el estándar ZigBee, y son recibidos por un computador central remoto, en donde son procesados, identificados, almacenados y puestos en pantalla para caracterizar el estado de la zona productiva. El trabajo fue puesto a prueba durante tres meses en un cultivo de brócoli al sureste Español y demostró completa operatividad⁵⁷.

⁵⁵ ZAPATA, Carlos y SÁNCHEZ, Andrés. Sistema Inalámbrico para la Supervisión de las Variables Ambientales de un Invernadero. En: Universidad del Quindío, 2010.

⁵⁶ ZHOU, Yiming, YANG, Xianglong, WANG, Liren, YING y Yibin. A wireless design of low- cost irrigation system using ZigBee technology. En: International Conference on Networks Security. 2009.

⁵⁷ LÓPEZ, J.A, SOTO, F, SUARDÍAZ, J, IBORRA, A. Red de Sensores Inalámbrica para Agricultura de Precisión. En: Universidad Politécnica de Cartagena. 2011.

2. METODOLOGÍA

La investigación asociada a este trabajo de grado se llevó a cabo en cuatro fases: Revisión y análisis bibliográfico, Adquisición de datos, Comunicación de datos, Definición y ejecución de acciones de control e Implementación y evaluación del prototipo. En cada una de ellas fue necesario definir una serie de actividades de corta y larga duración, que fueron organizadas y planificadas para mantener siempre coherencia entre la propuesta inicial y el resultado final. Gracias a la ejecución de dichas actividades el cumplimiento de cada uno de los objetivos de la investigación fue alcanzado.

2.1 FASE I: REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

En esta etapa fue necesario indagar muchas fuentes de información; aquellas de tipo documental que incluyeron monografías, revistas, artículos, investigaciones aplicadas y libros, y hasta de tipo oral recopiladas a través de entrevistas frecuentes a expertos en temas asociados a la agricultura, que fueron fundamentales para entender un campo ajeno a nuestra formación académica. En esencia, los temas principales que constituyen el soporte de la investigación fueron aquellos relacionados con la irrigación de cultivos, agricultura de precisión y por supuesto, redes de sensores inalámbricos. El marco teórico, anterior a este capítulo es el resultado de esta fase, su contenido fue minuciosamente seleccionado y construido a partir de definiciones propias que surgieron del análisis de las distintas fuentes indagadas, de los antecedentes en trabajos de aplicación similares y de las experiencias adquiridas durante todo el proceso de implementación.

2.2 FASE II: ADQUISICIÓN DE DATOS

En esta fase se describe todo el proceso que permitió establecer la relación entre la humedad del suelo del cultivo y la respuesta entregada por los sensores para garantizar que los valores de humedad comunicados en la WSN, fueran confiables para ejecutar acciones de control precisas. Para ello fue necesario realizar reconocimiento del sitio de aplicación, definir la ubicación de los sensores, analizar muestras de suelo y definir funciones matemáticas que expresaran la relación entre humedad y voltaje del sensor.

Puesto que esta fase permite el cumplimiento del primer objetivo, cabe aclarar que como fue claramente especificado en la propuesta, se dejó abierta la posibilidad de adquirir sensores comerciales o diseñarlos. Gracias al presupuesto aprobado y brindado generosamente por Fundación Social para esta investigación, se optó

por la adquisición de sensores de humedad de suelo comerciales de referencia 10HS.

2.2.1 Reconocimiento del sitio de aplicación. Para el desarrollo de la investigación fue seleccionado un cultivo de fresas con una infraestructura de riego por goteo ya establecida. El cultivo, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 6 y la Figura 13, hace parte de una finca ubicada en la vereda Buena Vista Alto del Corregimiento de Cabrera, a 4 Km de la ciudad de Pasto. El propietario del predio es la Cooperativa *APROBORCA* que acoge la siembra de fresas como su principal fuente de ingresos. Por su afán de desarrollo tecnológico y social, la finca de *APROBORCA* en varias ocasiones ha recibido el respaldo de *Fundación Social*; una organización no gubernamental enfocada en apoyar proyectos que impulsen el desarrollo rural del departamento Nariño. En vista del alcance potencial de este trabajo de grado, esta ONG apoyó generosamente la presente investigación y para procurar su misión, fue elegido como escenario de aplicación la finca de *APROBORCA*.

Tabla 6. Características del cultivo

CARACTERÍSTICA DEL CULTIVO	PARÁMETRO
Tipo de cultivo	Fresas
Área del cultivo (Largo x Ancho)	30 m x 17 m = 510 m ²
Número de surcos (o melgas)	30
Surco (Largo x Ancho, x Alto)	30 cm x 80 cm x 20 cm
Separación entre surcos	40 cm
Protección	Recubrimiento plástico gris acolchado en cada surco

Todos los surcos poseen dos cintas de goteo en cada borde lateral y están recubiertos con un plástico acolchado que cubre la tierra donde crece el cultivo; esto con el fin de prevenir la aparición de malezas, reducir la erosión del suelo y mantener la temperatura adecuada. La infraestructura de riego que acompaña el cultivo posee los principales elementos definidos para un sistema de riego por goteo tal como es indicado en la Tabla 7.

Figura 13. Cultivo de fresas – Finca APROBORCA



Tabla 7. Componentes del sistema de riego por goteo en la finca APROBORCA

ELEMENTO	RECURSO PRESENTE EN LA FINCA
Fuente de agua	Reservorio (Largo: 9 m Ancho 3 m : Profundidad 1.75 m)
Fuente impulsora de agua	Motobomba Centrífuga de 1½” NPT, 1.5 HP
Cabezal de riego	Filtro tipo anillo, Inyector Venturi, llaves de paso tipo cuña y manómetro.
Red de distribución	Mangueras de polietileno de 1½ “
Emisores de agua	Cintas de goteo (Emisores cada 10 cm)
Dispositivos de control	Llaves de paso manuales: Tipo cuña de 1½ “ para el control de la red de distribución y tipo mariposa para el control de cintas de goteo.

Cerca al cultivo, aproximadamente a 70 m, está ubicada la oficina central de la cooperativa APROBORCA, en la cual hay fácil acceso a energía eléctrica y posee un computador de escritorio con los componentes básicos que permitieron instalar el software y hardware requeridos en la investigación. A 15 m de la oficina, está ubicada la motobomba con una serie de tuberías y llaves de paso que la alimentan y dirigen el agua al cultivo a través de la red de distribución. Inicialmente la motobomba estaba conectada directamente a la red eléctrica a través de una

cuchilla de dos posiciones sin ningún tipo de protección, lo cual fue reemplazado por el diseño de un nodo de la red. A 35 m de ésta, cuesta arriba, está ubicado el reservorio de agua, el cual está equipado de mangueras que dirigen el agua a la motobomba cuando es encendida para su succión. Para evitar contaminación del reservorio, está cubierto de una fina malla que impide que restos de hojas o cuerpos extraños viajen por las mangueras y obstruyan la distribución de agua. La Figura 14 muestra gráficamente esta descripción.

Figura 14. Vista general del sitio de aplicación



2.2.2 Segmentación y muestreo del área cultivable. Como bien fue definido en el marco teórico, los cultivos presentan distintos tipos de variabilidad que sugiere la necesidad de la agricultura de precisión. Así, siguiendo con los conceptos de AP, una vez definido el sitio de aplicación, el siguiente paso consistió en analizar el área cultivable y elegir un conjunto de zonas de manejo bajo algún criterio de variabilidad, tal como se muestra en la Figura 15.

- **Zonas de manejo.** Al observar la topografía del cultivo, es evidente que está sembrado sobre una superficie irregular en su mayoría inclinada que, de acuerdo a la experiencia de los agricultores, no tiene un comportamiento completamente uniforme en cuanto a producción y desarrollo de la planta. De acuerdo a esta información relacionada con la variabilidad de campo, se

decidió segmentar el cultivo en tres zonas de manejo identificadas como: *Zona Alta*, *Zona Media* y *Zona baja*.

Por el bajo número de nodos sensores en la red acorde con el presupuesto, se trabajó solamente con un surco representativo de cada zona de manejo, como se muestra en la Tabla 8, en el cual fue ubicado un nodo sensor para monitorear su humedad particular y, de acuerdo a su evolución, aplicar un riego localizado como respuesta a su necesidad individual. Los resultados de esta práctica permitieron brindar indicios de la pertinencia de la AP en el manejo de riego, pues fueron comparados con los de un control de riego tradicional, en el que la necesidad de agua de todo el cultivo se generaliza, y es controlada de acuerdo al promedio de las humedades de suelo medidas en los tres surcos representativos.

Figura 15. Zonas de manejo definidas en el cultivo de fresas



- **Toma de muestras de suelo.** Para calibrar los sensores de humedad de suelo en el cultivo seleccionado, se tomaron cuatro muestras en distintos sitios; tres muestras no disturbadas⁵⁸ extraídas de los surcos representativos de cada una de las zonas de manejo, y una muestra disturbada representativa de todo el cultivo. Para este procedimiento se utilizaron tubos de PVC de 15.24 cm (6 pulgadas) de diámetro y de 25 cm de altura. Para extraer las muestras, cada tubo fue enterrado verticalmente a presión hasta alcanzar una profundidad de 20 cm. Se tomó esta profundidad después de comprobar que en la planta de fresa, su zona de

⁵⁸ Indica que la muestra de suelo fue alterada y no es fiel a la estructura original del suelo de donde fue extraída,

raíz se encuentra concentrada entre los primeros 20 cm (o 30 cm) de profundidad, desde la cual absorbe fácilmente el agua aprovechable para su desarrollo.

Tabla 8. Surcos representativos y parámetros de muestreo

Zona de Manejo	Surco Representativo	Tipo de Muestra	Profundidad de Extracción
Zona Alta	Surco 2	No Disturbada	20 cm
Zona Media	Surco 13	No Disturbada	20 cm
Zona Baja	Surco 25	No Disturbada	20 cm
Cultivo Total	15 Surcos	Disturbada	20 cm

Para el caso de las muestras no disturbadas, los tubos fueron presionados hasta lograr que el suelo dentro del tubo alcanzara los 20 cm. Para el caso de la muestra disturbada, representante de todo el cultivo, se cavaron hoyos de 20 cm de profundidad en 15 surcos diferentes; después en un tubo de PVC de base sellada de igual tamaño, se recolectó suelo de cada uno de los 15 surcos hasta alcanzar los 20 cm. La Figura 16 muestra imágenes relacionadas a este proceso.

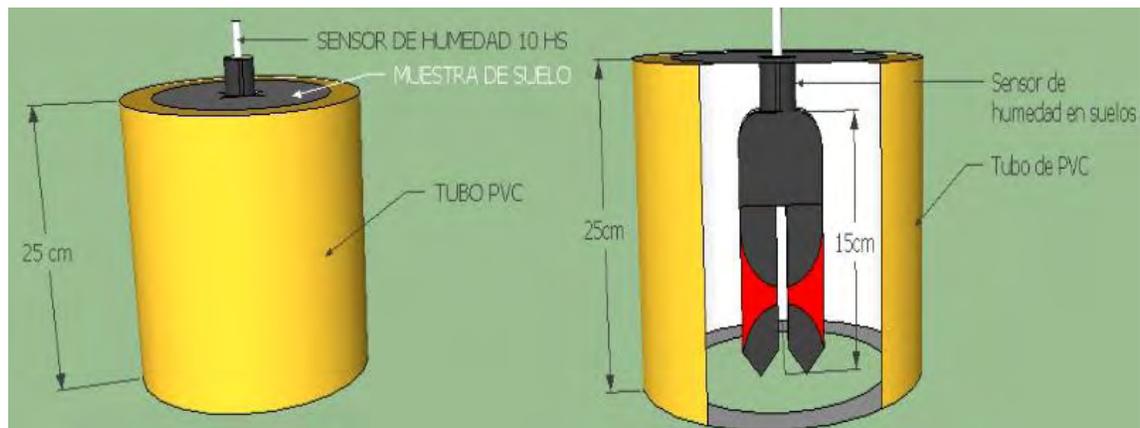
Figura 16. Toma de muestras usadas para la investigación



2.2.3 Calibración de sensores 10HS. Para determinar el contenido de agua de cada surco y el contenido de agua promedio de todo el cultivo, se utilizaron 3 sensores 10HS. Estos dispositivos fueron elegidos por su bajo consumo de potencia, alta precisión, y principalmente porque garantizan un amplio volumen de sensibilidad; esto es, que el valor que miden refleja el contenido de humedad no sólo del reducido espacio donde están instalados, sino el de varios cm^3 a la redonda. Como bien es mencionado en el marco teórico, el fabricante recomienda calibrar los sensores de acuerdo al cultivo de aplicación, en nuestro caso, el cultivo de fresas.

Para este procedimiento fue necesario determinar la humedad de suelo a partir del método volumétrico usando las muestras de suelo, y relacionar estos resultados con aquellos entregados por los sensores al ser instalados en las mismas muestras. Por esto en cada muestra de suelo fue insertado verticalmente un sensor 10HS en la zona central del tubo de PVC, de tal forma que abarcará el mínimo volumen de sensibilidad de acuerdo a la nota de aplicación del fabricante⁵⁹, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Instalación de sensor 10HS en muestra de suelo



- **Recolección de datos.** Una vez listas las muestras con los sensores instalados en su interior, se procedió a humedecer el suelo contenido en su interior. Para esto, fue agregado agua con ayuda de un dosificador hasta lograr que ésta llegara al fondo del tubo de tal forma que el suelo quedara saturado. Con las muestras saturadas, los tubos fueron trasladados a una zona descubierta para que pudieran secarse de forma natural con ayuda del aire y el sol (similar a las condiciones del cultivo de fresas), Al mantener

⁵⁹COBOS, Doug. 10HS Volume of Sensitivity. En: Application Note, Decagon Devices. 2008. p. 1-2.

estas condiciones durante 10 días, fue posible recolectar diariamente datos de cada una de las muestras mientras se iban secando. Así, con ayuda de un voltímetro y una balanza, una serie de datos fue recolectado simultáneamente ya que cada día, el voltaje entregado por el sensor iba cambiando y el peso de las muestras iba bajando. La Tabla 9 y la Figura 18 muestran los materiales usados y algunas imágenes de este procedimiento.

Tabla 9. Elementos usados para calibración de sensores

ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN			
Muestras de Suelo	Surco 2	Surco 13	Surco 25	Todo Cultivo
Agua Dosificada	500 mL	400 mL	450 mL	500 mL
Sensores	3 Sensores de humedad volumétrica de suelo 10HS			
Voltímetro digital	Escala milivoltios			
Balanza digital	Escala Gramos - Sensibilidad 1g			
Horno de secado	Temperatura 75°C			

Figura 18. Recolección de datos de calibración



- **Cálculo de humedad volumétrica (θ_v).** Con los datos referentes al peso diario de las muestras, fue posible calcular la humedad volumétrica del suelo y asociarlo con el voltaje entregado por el sensor al instante mismo en el que la muestra fue pesada. Para esto, fue necesario aplicar el método volumétrico que implica evaluar los datos recolectados en un conjunto de ecuaciones que involucran el volumen del tubo de PVC que contiene las muestras de suelo. La Tabla 10 muestra todas las relaciones usadas.

Tabla 10. Ecuaciones para el cálculo de humedad volumétrica

$\theta_v(\%) = \frac{V_W}{V_T} * 100$		$V_W = \frac{P_{SH} - P_{SS}}{\hat{\rho}_W}$		$V_T = \Pi * r^2 * L$	
Variable	Descripción	Variable	Descripción	Variable	Descripción
θ_v	Humedad Volumétrica	P_{SH}	Peso de suelo húmedo	Π	3.1416...
V_W	Volumen de agua en la muestra	P_{SS}	Peso de suelo seco	r	Radio del contenedor de la muestra (Tubo PVC)
V_T	Volumen total de la muestra	$\hat{\rho}_W$	Densidad del agua = 1g/cm ³	L	Altura que alcanza la muestra en el contenedor (Tubo PVC)

Como se hace evidente en la Tabla 10⁶⁰, para determinar el volumen de agua en la muestra es necesario conocer el peso del suelo completamente seco. Para esto, después de cumplirse los 10 días de recolección de datos, las muestras fueron llevadas al laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño, donde están disponibles varios hornos de secado para este tipo de prácticas. Aún cuando el método volumétrico implica secar las muestras en un horno de 105°C durante 48 horas, por el tamaño de las muestras, no fue posible usar este horno, pero si un horno de secado a 75°C. Para evitar errores a esta temperatura, las muestras fueron dejadas en el horno durante 72 horas. Una vez cumplido este tiempo, las muestras de suelo completamente secas fueron pesadas y, con estos datos recolectados, finalmente se aplicaron las ecuaciones para determinar la humedad volumétrica en función del tiempo. La Tabla 11 muestra los resultados finales de este cálculo para cada muestra.

⁶⁰ COBOS, Doug, CHAMBERS Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensores.,Chris.. En: Application Note, Decagon devices. Noviembre. 2010. p. 4-7.

El Anexo A muestra detalladamente el procesamiento de los datos recolectados y su evaluación en las ecuaciones de la Tabla 10, que permitieron obtener las curvas y las ecuaciones de calibración.

Tabla 11. Humedad volumétrica de suelo θ_v y Voltaje de sensor durante 10 días

MUESTRA		θ_v (%) y V (mV) en el tiempo									
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
Surco 2	θ_v	44.59	44.12	43.79	40.12	40.01	38.12	36.75	35.62	33.43	32.03
	V	1079.0	1068.2	1060.2	1010.6	999.8	961.2	941.2	926.0	894.0	871.0
Surco 13	θ_v	45.83	44.65	43.53	40.70	37.28	36.07	34.65	31.74	29.93	28.73
	V	1100.0	1084.2	1069.0	1027.0	981.6	964.0	940.8	915.8	897.0	872.2
Surco 25	θ_v	45.01	44.82	43.01	40.38	39.11	38.35	34.29	33.22	29.93	29.44
	V	1070.6	1065.4	1039.0	998.4	980.8	971.8	920.8	901.6	867.6	858.0
Todo Cultivo	θ_v	47.36	46.84	44.19	40.59	39.74	38.81	36.46	34.32	32.73	30.40
	V	1087.0	1074.2	1031.0	975.8	964.8	947.6	914.4	886.4	873.2	837.0

2.2.4 Curvas y ecuaciones. El último paso realizado en esta fase consistió en expresar la relación entre la humedad volumétrica y el voltaje entregado por los sensores a través de una ecuación matemática. Siendo los sensores elementos de medición indirectos, el contenido volumétrico de agua en el suelo debe calcularse a partir del valor de voltaje entregado por los sensores cuando estén instalados en el suelo de aplicación; de acuerdo a esto, es necesario establecer una función de la forma: $\theta_v = f(V)$, definiendo la humedad volumétrica (θ_v) como la variable dependiente y el voltaje del sensor (V) como la variable independiente. Puesto que esta función puede tomar distintas formas (lineal, polinómica, exponencial, entre otros), fue necesario organizar los datos de la Tabla 9, como pares ordenados (V, θ_v) sobre un plano cartesiano para formar un gráfico de dispersión, y con ayuda de un software especializado definir la tendencia o el tipo de curva que mejor se ajusta al comportamiento de los datos experimentales; a todo se le conoce como *regresión*.

- **Construcción de algoritmo de regresión.** Para realizar la regresión se usó el ToolBox de Matlab denominado *Curve Fitting*; el cual provee un conjunto de comandos y herramientas gráficas que permiten principalmente analizar datos experimentales, comparar distintos modelos de regresión, definir condiciones iniciales, graficar resultados y encontrar coeficientes para construir ecuaciones. Para utilizarlo se requiere importar los datos

experimentales ya sea a través de su interfaz gráfica o definiendo un código fuente, es posible realizar todo tipo de regresiones y verificar el grado de bondad del ajuste para decidir cuál es el mejor. Para esta investigación fue construido un código en Matlab para evaluar únicamente regresiones de tipo polinomial (por recomendación del fabricante de los sensores), usando comandos propios del ToolBox y elegir el mejor ajuste. La Tabla 12 muestra los parámetros más importantes que fueron usados y definidos en el algoritmo de regresión.

Tabla 12. Principales comandos de Curve Fitting Toolbox

Comando	Descripción	Parámetro Usado
fit	Entrega los coeficientes del polinomio de grado n que se ajusta a los datos y los parámetros que definen la bondad del ajuste (r^2 , SME)	fit(V , θ_V , fittype, properties)
fittype	Define el tipo de regresión soportado por el Toolbox, en el caso de ser polinomial, el máximo grado del polinomio es 9.	'poly1', 'poly2', 'poly3'
lower	Es una propiedad que define a través de un vector, el valor más pequeño que pueden tomar los coeficientes del polinomio durante el proceso de regresión.	[-inf, -inf, -6 ⁶¹] Regresión Polinomial de grado 3
polyval	Después de hallar los coeficientes del polinomio, permite evaluar la variable independiente en la función resultante y verificar el ajuste ⁶²	polyval(Coeficientes de polinomio, V)

- **Regresiones polinomiales y coeficientes de ajuste.** A cada conjunto de datos (V, θ_V) asociados a las 4 muestras de suelo, les fue aplicada tres tipos de regresiones: lineal, polinomial de grado 2 y polinomial de grado 3. Gracias a las opciones de Curve Fitting, en cada regresión fue posible obtener una ecuación matemática alusiva a los datos experimentales, y adicionalmente, el valor de los coeficientes R^2 y $RMSE$ que permitieron evaluar la bondad de cada ajuste. Las Figuras 19 y 20 muestran gráficamente la regresión polinomial de grado 2 para cada muestra de suelo evaluada y el Anexo B detalla las regresiones adicionales.

El *coeficiente de determinación* R^2 indica, en qué grado la variabilidad de los datos es explicada o representada por la curva que se ajusta. Este valor

⁶¹ Se define para todas las regresiones que el coeficiente independiente del polinomio resultante (ecuación) sea mínimo -6, para garantizar que el cruce por cero de la curva de tendencia ocurra en un punto similar al de la curva de calibración estándar definida por el fabricante de los sensores.

⁶² Disponible en: <<http://www.mathworks.com/help/curvefit/index.html>>

está entre 0-1 y el mejor ajuste será aquel que más se acerque a la unidad. Por otra parte la *raíz del error cuadrático medio RMSE* es un indicador de la magnitud media de los errores o dispersiones que se tendrán al utilizar la curva que se ajusta. Este valor está entre 0-1 y el mejor ajuste será aquel que más se acerque a cero⁶³. Así, considerando estas dos referencias, y para evitar ecuaciones con coeficientes extremadamente pequeños, se definió como curva de ajuste para todas las muestras, la polinomial de grado 2. Lo que significó que todas las ecuaciones de calibración resultaron funciones cuadráticas. La Tabla 13 indica los coeficientes de ajuste para cada regresión.

Figura 19. Regresión polinomial de grado 2 - Surco 2 y Surco 13

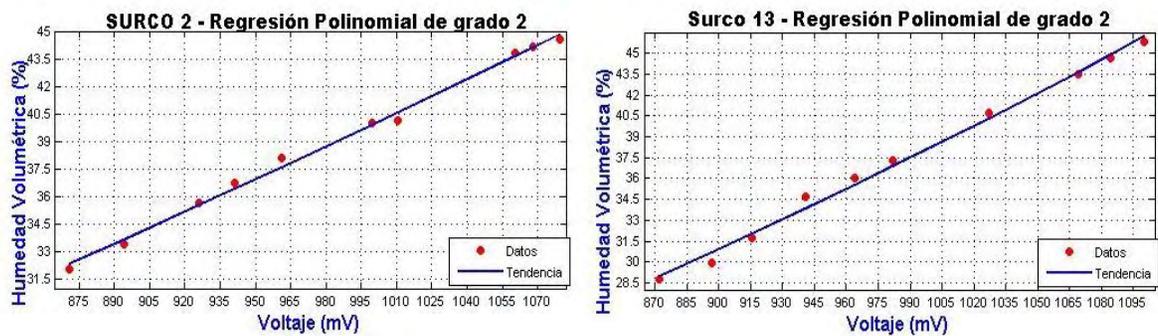
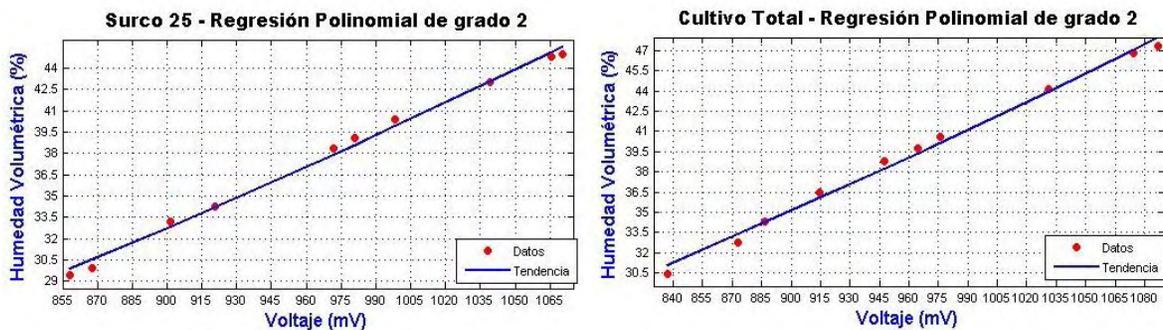


Figura 20. Regresión polinomial de grado 2 - Surco 25 y Todo Cultivo



Aún cuando los resultados de la regresión polinomial de grado 3 mostrados en la Tabla 13 representan el mejor ajuste para algunos casos, la diferencia con la regresión de grado 2 no es muy significativa ya que solo genera ecuaciones con coeficientes principales de muchas cifras decimales

⁶³ CAMPOS, Daniel. Ajustes de Curvas - Regresión y correlación polinomial. En: Introducción a los métodos numérico: Software en Basic y Aplicaciones en Hidrología Superficial. Noviembre. 2002. p. 100-102.

que, aunque brindan mayor precisión, no resulta ser importante para justificar un modelo más matemático más complejo.

Tabla 13. Coeficientes de ajuste

Tipo de Regresión	Surco 2		Surco 13		Surco 25		Todo Cultivo	
	R ²	RMSE						
Lineal	0.8472	2.2644	0.8207	2.6194	0.8472	2.2644	0.9990	0.2070
<u>Polinomial grado 2</u>	<u>0.9944</u>	<u>0.4618</u>	<u>0.9934</u>	<u>0.5335</u>	<u>0.9944</u>	<u>0.4618</u>	<u>0.9927</u>	<u>0.5270</u>
Polinomial grado 3	0.9994	0.1652	0.9975	0.3539	0.9994	0.1652	0.9990	0.2070

- **Ecuaciones de calibración.** Finalmente, las ecuaciones matemáticas resultantes de la calibración polinomial de grado 2, aplicada a las 4 muestras de suelo que representan las distintas zonas de manejo son mostradas en la Tabla 14.

Tabla 14. Ecuaciones de calibración

Zona de Manejo	Surco Representativo	Ecuación
Alta	Surco 2	$\theta_v = 1.46E - 05 * V^2 + 0.03132776 * V - 6$
Media	Surco 13	$\theta_v = 3.20E - 05 * V^2 + 0.01225426 * V - 6$
Baja	Surco 25	$\theta_v = 2.97E - 05 * V^2 + 0.01629721 * V - 6$
Cultivo Promedio	Todo Cultivo (15 Surcos)	$\theta_v = 2.14E - 05 * V^2 + 0.0263603 * V - 6$

2.3 FASE III: COMUNICACIÓN DE DATOS

Esta fase describe el diseño de la WSN detallando los componentes usados para construcción de los nodos de la red, y centrándose en el cumplimiento del segundo objetivo de esta investigación. La red diseñada consta de seis nodos; tres de ellos son nodos sensores, dos son nodos actuadores y uno es el nodo coordinador de la red. Todos ellos se comunican siguiendo la pila de protocolos ZigBee, desempeñando sus respectivos roles tanto de coordinador como de dispositivos finales. Están organizados bajo una topología en estrella en donde el coordinador es el punto central que gestiona toda la información y establece una comunicación directa con los demás nodos. En el Anexo C se expone la distribución espacial de la red en el sitio de aplicación.

2.3.1 Descripción del diseño. Para lograr que la WSN monitoree y controle la humedad de suelo del cultivo, los tres nodos sensores ubicados en los surcos

representativos (2, 13 y 25) miden el nivel de humedad volumétrica del suelo, en el que están instalados, cada cierto tiempo (tiempo de muestreo), o, de forma continua. Los nodos sensores que también incluyen actuadores (electroválvulas para riego sitio-específico), transmiten el valor de la humedad medida vía RF hacia el nodo coordinador, quien lo recibe y lo envía a través de una interfaz serial a un computador personal, provisto de un software que procesa los datos y los despliega a través de una interfaz gráfica, para que el usuario conozca la humedad promedio de todo el cultivo, y el nivel de humedad individual de los tres surcos (que representan las tres zonas de manejo).

Cada vez que los datos de humedad ingresan al computador, el software evalúa si el valor de humedad medido esta dentro o fuera de un rango permisible. Dependiendo de los resultados de éste análisis, una señal de control es enviada vía RF para activar o desactivar los actuadores que habilitan el paso de agua de riego total o sitio específico de acuerdo al tipo de control seleccionado por el usuario.

Para cubrir los requerimientos referentes a la comunicación de datos, se eligió como principal componente de cada nodo, el módulo *XBee Series 2 PRO* (Tabla 4) que brinda funcionalidad de ADC para la toma de muestras de humedad de suelo, y de puerto de salida para controlar actuadores con señales digitales. Finalmente la Tabla 15 muestra en resumen las características de la WSN diseñada y en el Anexo D se muestra el diagrama de bloques de cada nodo de la red diseñada en forma modular como se explica a continuación.

Tabla 15. Características principales de la WSN diseñada

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN
Protocolo de Comunicación	ZigBee (Extensión de IEEE 802.15.4)
Número de nodos de red	6 NODOS (1 nodo coordinador, 3 nodos sensores, 2 nodos actuadores)
Topología	Estrella (1 Coordinador y 5 Dispositivos finales)
Banda de Frecuencia	2.4 GHz
Velocidad de transmisión	250 Kbps
Canal DSSS	15 (Evitar interferencias por redes WI-FI)
Alcance	80 m – 120 m

2.3.2 Nodo estación base – Coordinador. En la red, de acuerdo a la pila de protocolos ZigBee existe un solo coordinador, en este caso está ubicado al interior de la oficina de la finca APROBORCA que usa una antena tipo dipolo omnidireccional externa para establecer comunicación con los dispositivos finales de la red. El nodo está conformado por un computador personal con software de control, una interfaz serial, un módulo de comunicación con antena externa e

interfaces adicionales para su conexión. El Anexo E muestra los componentes de este nodo.

2.3.2.1 Módulo de procesamiento. Dada la responsabilidad del coordinador de red, el módulo de procesamiento está representado por un computador personal dotado de un software para gestionar todos los datos de la red y definir las acciones de control. El diseño recae en la construcción del algoritmo del control que es explicado en la Fase IV de ésta investigación.

2.3.2.2 Módulo de comunicación. Como ya fue mencionado, fue elegido un *XBee Pro Series2*, para el caso del nodo coordinador se usó un módulo con conector *RPSMA* para conectar antena omnidireccional externa y procurar línea de vista con los nodos sensores ubicados en el cultivo. Este módulo va conectado al puerto USB de un computador personal a través de una interfaz serial denominada *Tarjeta XBee Explorer*; esta interfaz tiene un conector USB y un zócalo donde el módulo XBee es insertado. Para que el computador reconozca el dispositivo es necesario instalar los driver adecuados para que se genere un puerto serial virtual para intercambiar datos entre PC Y XBee.

Para que el módulo de comunicación cumpla sus funciones de transmisión de señales de control y recepción de muestras de humedad de suelo, fue cargado previamente con el firmware y la configuración adecuada. Para esto fue necesario usar el programa *XCT-U*, a través del cual se definieron y grabaron los parámetros mostrados en la Tabla 16 a través de la opción “Modem Configuration” de la interfaz del *XCT-U*. El modo API fue definido en el módulo para que se pueda acceder a las muestras tomadas por los ADCs de los nodos sensores remotos, puesto que como fue explicado, las muestras remotas solo pueden ser leídas bajo este modo. En cuanto a la dirección de red definida como *PAN ID* y compuesta por 16 bits, puede ser definida por el usuario, sin embargo se la configura de tal manera que sea el mismo módulo que la defina y la asigne a los demás nodos de red.

Tabla 16. Configuración módulo XBee PRO S2 - Nodo Coordinador

PROPIEDAD	PARÁMETRO (Descripción)
Modem	XBP24-ZB (XBP indica que es tipo Pro y ZB que usa el estándar ZigBee)
Function Set	ZigBee Coordinador (Configurado como coordinador en Modo API)
Firmware Versión	21A7 (Código del fabricante para la versión de firmware)
PAN ID - 16 bits	0x0000h (Configurado para que elija una dirección aleatoria)
Canal DSSS	15 (Evitar interferencias por redes WI-FI)
Detination Address – 64bits	0X000000000000FFFFh (Dirección de broadcast para transmitir simultáneamente a todos los nodos de red - inicialmente)

La dirección de destino de 64 bits no se define de forma particular puesto que el coordinador debe enviar información a cinco nodos distintos (nodos sensores y nodos actuadores) y no a un solo destino; por eso se establece una dirección de broadcast provisional, que será obviada y reemplazada por la dirección de destino especificada en las tramas API enviadas a los nodos de la red ya sea para solicitar muestras de humedad de suelo o enviar señales de control⁶⁴.

2.3.2.3 Módulo de alimentación eléctrica e Interfaces. La alimentación del módulo de comunicación proviene del bus USB a través de la tarjeta XBee Explorer que se encarga de adecuar el voltaje necesario para el funcionamiento del módulo. Para el caso de módulo de procesamiento representado por el software instalado en el computador personal, este se alimenta directamente de la red eléctrica domiciliaria usado un regulador de voltaje para su protección. Las interfaces, como ya fue mencionado para conectar el módulo XBee al computador personal fue utilizada la tarjeta XBee Explorer con cable USB de 50cm de largo. Para conectar el módulo XBee Pro Series 2 a la antena (2.4GHz de 5dbi), se usó un adaptador RP-SMA hembra a SMA hembra y 50cm de cable coaxial RG58.

2.3.3 Nodos sensores – Dispositivos finales. En la red existen tres nodos sensores, cada uno ubicado a la intemperie en los surcos representativos de las tres zonas de manejo, definidas inicialmente como: zona alta (Surco 2), zona media (Surco 13) y zona baja (Surco 25). Cada nodo está encargado de medir la humedad de suelo y comunicarla inalámbricamente al nodo coordinador cada vez que éste lo solicite. Después que el coordinador evalúa el dato de humedad, los nodos sensores deben recibir vía RF una señal de control para modificar el estado de su respectiva electroválvula, que habilita o inhabilita el paso de agua hacia el surco. El Anexo F muestra el esquema circuital de este nodo.

2.3.3.1 Módulo de sensado. El módulo de sensado está conformado por el sensor de humedad de suelo 10HS cuyas características se describen en la Tabla 1 y su calibración fue especificada en la primera fase de la metodología de esta investigación. No fue necesario usar filtros puesto que después de realizar pruebas de desempeño iniciales en distintos tipo de suelos, y corroborar su comportamiento durante el proceso de calibración, el sensor siempre entregó un voltaje de salida con mínimas fluctuaciones. Tampoco fue necesario usar circuitos acondicionadores de niveles de voltaje para acoplar la salida del sensor al módulo de procesamiento para su digitalización (ADC), pues el máximo voltaje de salida del sensor es menor a 1200mV, lo cual es directamente compatible con el máximo voltaje de referencia del ADC utilizado.

2.3.3.2 Módulo actuador. Este módulo sólo se usa cuando se define en la estación base un control sitio-específico exclusivo para los tres surcos representativos, sino, no entra en funcionamiento. Está conformado por una

⁶⁴ FALUDI, Op. Cit., p. 33-36

electroválvula AC de ½" normalmente cerrada (NC) y un circuito de potencia que permite acoplarla con el módulo de procesamiento, para que pueda recibir señales digitales de control ON/OFF. La electroválvula está conectada a las dos cintas de goteo extendidas a lo largo del surco a través de adaptadores, llaves de paso manuales y un arreglo de tubería, que permiten habilitar el paso de agua hacia el surco, cuando la electroválvula esté activada (ON).

La electroválvula debe adoptar el estado que defina el nodo coordinador después de analizar y determinar si el nivel de humedad del surco es o no apropiado. La señal de control que envía el nodo coordinador al nodo sensor se manifiesta como una señal digital en alto o bajo en el puerto de salida del módulo de procesamiento. En dicha salida, es justamente donde debe estar conectada la electroválvula para que acepte el pulso digital de control y modifique su estado; sin embargo, esta conexión no se hace directamente pues la electroválvula maneja un voltaje AC y el puerto de salida del módulo de procesamiento solo maneja niveles de voltaje DC de mínima corriente. Como se puede observar en el Anexo F se usó como principal elemento un Triac. Éste fue elegido por ser un conmutador de AC sin elementos mecánicos que se desgasten, y por su facilidad para controlar sus estados de disparo y bloqueo.

La electroválvula fue conectada entre los terminales principales del Triac y se agregó un Optotriac para controlar a partir de señales de voltaje DC, el disparo y bloqueo de la electroválvula a través del triac. Fue elegido un optotriac con detector de cruce por cero, para asegurar que el Triac se dispare cuando la señal AC haya cruzado por cero; esto es importante pues evita que la electroválvula esté sometida a cambios bruscos de voltaje durante la conmutación⁶⁵.

El circuito posee una protección denominada Red Snubber, formada por una resistencia y un capacitor en serie (R_1C_1) que actúa como un amortiguador de picos o escalones de voltaje de alta amplitud que pueden disparar el triac de forma inesperada. Su presencia en el circuito se hace necesaria puesto que la electroválvula representa una carga inductiva, y en ésta la señal de corriente está atrasada respecto al voltaje, de tal forma que el cruce por cero de las dos señales no ocurre en un mismo instante. Por tanto cuando la corriente es cero y el triac se apaga, el voltaje ya ha alcanzado una amplitud máxima, la cual se manifiesta en la electroválvula y en la salida del triac como un cambio brusco de voltaje, que hace que el triac se dispare descontroladamente en cada cruce por cero, independientemente de la señal de control aplicada. Cabe anotar que los picos de voltaje provenientes de la red eléctrica, también pueden causar un disparo no deseado pero la red snubber también puede amortiguarlos. Los valores de la

⁶⁵ ON SEMICONDUCTOR, Triac Theory. En: Thyristor theory and desing configuration, HandBook. Noviembre. 2006. p. 22-28.

resistencia y capacitor que lo componen son recomendados por el fabricante y en la mayoría de casos elegidos de forma experimental, como ocurrió en este caso⁶⁶.

2.3.3.3 Módulo de comunicación/procesamiento. Para el caso de los nodos sensores fueron elegidos módulos *XBee Pro Series2* con antena tipo chip integrada. Estos dispositivos fueron usados para la comunicación y el procesamiento gracias a la funcionalidad de sus entradas análogas como ADCs y a sus salidas digitales configurables. La Tabla 17 describe la configuración inicial del XBee Pro S2 usado.

Los parámetros descritos fueron cargados en el módulo de la misma manera que se hizo con el módulo del nodo coordinador. Su configuración fue definida de acuerdo a las dos tareas principales que deben cumplir el nodo en la red. La primera consiste en recibir el voltaje DC entregado por el sensor, digitalizarlo, empaquetarlo y transmitirlo al nodo coordinador cada vez que éste lo solicite. Puesto que la unidad de procesamiento del módulo posee la funcionalidad de un ADC para todas sus entradas análogas, se usó una de ellas para ingresar la señal de voltaje entregada por el sensor y lograr su digitalización

Tabla 17. Configuración módulo XBee PRO S2 - Nodo Sensor

PROPIEDAD	PARÁMETRO (Descripción)
Modem	XBP24-ZB (XBP indica que es tipo Pro y ZB que usa el estándar ZigBee)
Function Set	ZigBee Router/ End Device AT (Configurado como dispositivo final en Modo Comando AT)
Firmware Versión	21A7 (Código del fabricante para la versión de firmware)
PAN ID - 16 bits	0x0000h (Configurado para que se una al nodo coordinador)
Canal DSSS	15 (Igual canal que el nodo coordinador)
Detination Address – 64bits	0X0000000000000000h (Especifica como dirección de destino exclusiva el nodo coordinador)
Entrada Análoga (ADC de 10bits)	AD0 = 2 (EL pin 20 se configura como entrada del ADC que recibe directamente el voltaje de salida análogo del sensor 10HS)
Resistencias de Pull-Up	PR = 009C (Bitmask que activa la resistencias de pull – up interna de la entrada análoga AD0)
Salida Digital	D4 = 3 (El pin 11 se configura como salida digital inicialmente en bajo, para controlar la electroválvula – Su máxima corriente de salida es 4mA)
Muestreo Periódico	IR = 0 (Inicialmente desactivado. Es activado por solicitud del nodo coordinador)
Indicadores de funcionamiento	RSSI = 1 (Habilita el pin 6 como indicador de nivel de señal recibida) ASSOC LED = 1 (Habilita el pin 15 para que indique cuando el módulo se unió a la red)

⁶⁶ TECCOR, Electronics. Thyristors used as AC static switches and relays. En: Application Note AN1007. 2002. p. 1-6.

El ADC del módulo es de 10 bits (n), admite directamente voltajes que varíen entre 0 V y 1200 mV (V_{ref}) que vienen predefinidos por el fabricante y no pueden ser modificados. De acuerdo a esto el mínimo cambio de voltaje en la entrada del ADC que produce un valor digital distinto (D) viene dado por:

Ecuación 3.

$$D = \frac{V_{ref}^+ - V_{ref}^-}{2^n - 1} = \frac{1.2V - 0V}{2^{10} - 1} = 1.173 \text{ mV}$$

Así, si el mínimo nivel de humedad volumétrica que puede medir el sensor es de 0.08% equivalente a 1.92 mV (según datos del fabricante); implica que el ADC del módulo si es capaz de asignar un valor binario distinto, ante el mínimo cambio de humedad que el sensor puede detectar. Para almacenar el voltaje binario del sensor, el módulo reserva un arreglo de 2 bytes (16 bits), que es incluido en una trama para transmitirla al nodo coordinador, cada vez que éste lo solicite. Es importante agregar que para usar la entrada análoga fue activada la resistencia de pull-up por software para evitar una conexión de la misma de forma externa.

La segunda tarea consiste en recibir la señal de control enviada por el coordinador para cambiar el estado de la electroválvula, que gestiona el riego por goteo en el surco. Esta recepción la hace la unidad de comunicación del módulo y la unidad de procesamiento se encarga de configurar la salida digital D4 del módulo en alto o bajo, dependiendo de la orden del coordinador. Esta salida digital está conectada al módulo actuador a través de un transistor NPN 2N2222 actuando en corte y saturación (alto o bajo). Su base se conectó a la salida digital con una resistencia limitadora que aseguró una corriente de 130 μ A en saturación; su colector se conectó a la entrada del optotriac con una resistencia de 120 Ω que aseguró una corriente 25 mA, para disparar los elementos del módulo actuador.

En el Anexo F se agrega el diagrama circuital de este módulo donde se especifican todos los elementos usados y sus respectivas conexiones. En este se observan los indicadores de funcionamiento nombrados en la Tabla 18, representados por dos LEDs verde y amarillo, que se encienden cuando el módulo XBee se unió a la red y cuando se han recibido datos exitosamente. Su conexión a las salidas digitales se hace también a través de transistores para evitar exceder los 4mA permitidos por el módulo⁶⁷.

2.3.3.3 Módulo de alimentación eléctrica e interfaces. Para energizar el módulo actuador, se usó 110 VAC conectados a través de un fusible de protección. Para energizar los otros módulos se utilizó una fuente de voltaje

⁶⁷ Ibid., p. 85-92.

conmutada de 12 VDC/4.2 A, la cual tiene integrado un sistema de protección contra corto circuito, sobrecarga y sobrevoltaje. Puesto que el módulo de sensado requiere 5 VDC para su funcionamiento, se utilizó un regulador fijo del mismo valor y para el módulo de comunicación/procesamiento se utilizó un regulador de 3.3 VDC pues el dispositivo XBee así lo requiere. (En el anexo F se puede observar la referencia de los dispositivos mencionados). Para realizar las conexiones entre los módulos y su fuente de alimentación eléctrica se utilizó como interfaz alambre; para la distribución de voltaje AC y DC dentro del cultivo, se usó alambre calibre 14 AWG que permite una corriente nominal de aproximadamente 6 A; valor suficiente si se considera un consumo de corriente de aproximadamente 1 A por cada nodo sensor.

2.3.4 Nodos actuadores – Dispositivos finales. En la red existen dos nodos actuadores, uno de ellos ubicado aproximadamente a 85cm del cultivo conformado por la motobomba, y el otro ubicado a la salida del cabezal de riego conformado por una electroválvula de 1-½” pulgadas. Cada nodo actúa únicamente como un receptor que acepta las instrucciones enviadas por el coordinador y las ejecuta impulsando o frenando el suministro de agua, ya sea para que se efectúe un riego sitio específico (exclusivo para los tres surcos representativos) o un riego generalizado para todo el cultivo (riego tradicional). El Anexo G muestra el esquema circuital de estos nodos.

2.3.4.1 Módulo actuador. Para el caso de los dos nodos actuadores, también fueron elegidos módulos XBee Pro Series2 de antena tipo chip integrada. Se usaron para la comunicación y el procesamiento por su funcionalidad de salidas digitales configurables. La Tabla 22 describe la configuración inicial del XBee Pro S2 usado. Este módulo siempre se usa, ya sea cuando se define en la estación base un control de riego sitio-específico (exclusivo para los tres surcos representativos) o un control de riego generalizado en todo el cultivo. Los dos nodos usan actuadores distintos: Una motobomba y una electroválvula; los dos actuadores son necesarios pues, al ser la motobomba el elemento que impulsa el agua hacia todos los cultivos de la finca, era necesario incluir un elemento adicional (electroválvula) que mantuviera el cultivo seleccionado aislado del flujo de agua impulsado cada vez que la motobomba se encendiera para regar otros cultivos.

Para el caso del *módulo actuador electroválvula*, ésta es AC de 1-½” pulgadas normalmente cerrada (NC) y un circuito de potencia que permite acoplarla con el módulo de procesamiento, para que pueda recibir señales digitales de control ON/OFF. La electroválvula está conectada a 20 cm del cabezal de riego, empatada en la manguera principal que distribuye el agua a todos los surcos del cultivo. El funcionamiento, su conexión y el circuito de potencia es similar a lo explicado en el módulo actuador del nodo sensor; a excepción de un mayor consumo de potencia por parte del actuador.

Para el caso del diseño del *módulo actuador motobomba*, fue necesario medir con ayuda de una pinza amperimétrica la corriente demandada por el actuador debido a la escasa información que el fabricante brinda al respecto. En la Tabla 18, se muestran los datos medidos y algunas características adicionales que resultaron útiles para definir los elementos del circuito de potencia.

Tabla 18. Características eléctricas de motobomba

CARACTERÍSTICA ELÉCTRICA	DESCRIPCIÓN
Tipo de Motor	Monofásico
Potencia	1.5 HP (1.125 KW)
Voltaje	110 VAC
Corriente Nominal	15 A
Corriente de Arranque	45 A
Duración Régimen transitorio	<20 ms

Inicialmente para el diseño del circuito de potencia se consideró el uso de contactores ó relés electromagnéticos, recomendados para controlar cargas de alto amperaje, sin embargo, al estudiar a fondo esta posibilidad se concluyó que presentan muchas desventajas como: vida útil relativamente corta, alta corriente de disparo, respuesta lenta, rebote de contactos y alto costo. Por todo esto se decidió usar, el mismo modelo del circuito de potencia de los nodos sensores, pero seleccionando un triac de corriente nominal igual a 40 A, corriente pico no repetitivas de 420 A, y capaz de soportar temperaturas de juntura de hasta 150°C. Las características de los elementos involucrados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Componentes del circuito de potencia – Nodos actuadores

ELEMENTO	PARÁMETRO MOTOBOMBA	PARÁMETRO ELECTROVÁLVULA
Actuador	1.5 HP (1.125 KW), $I_{nominal} = 15$ A	$I_{nominal} = 1$ A
Protección	Breaker 16 A – Curva de disparo C	Fusible 1.5A
Triac	BTA41-600 / 40 A	BT139-16 / 16A
Optotriac	Moc3061	Moc3061
Disipador Térmico	Tipo aletas - 4mmx8mm - Aluminio	No
Red Snubber	$R = 100/1$ W $C = 0.1$ uF/600 V	$R = 100/1$ W $C = 0.01$ uF/500 V

Debido al alto amperaje manejado por el triac, fue necesario incluir un disipador de aletas. Como sistema de protección eléctrico, al tratarse de un motor monofásico, se utilizó un disyuntor termomagnético (breaker) en la entrada de 110 VAC, para que se dispare automáticamente ante una sobrecarga o un cortocircuito. Aún

cuando la protección más indicada es un guardamotor, se descarto esta posibilidad pues su costo es elevado. Tanto el optotriac como la red snubber también fueron incluidos en el circuito de potencia, con la misma funcionalidad que el de los nodos sensores.

2.3.4.2 Módulo de comunicación/procesamiento. Para el caso de los dos nodos actuadores, también fueron elegidos módulos XBee Pro Series2 de antena tipo chip integrada. Se usaron para la comunicación y el procesamiento por su funcionalidad de salidas digitales configurables. La Tabla 20 describe la configuración inicial del XBee Pro S2 usado.

Tabla 20. Configuración módulo XBee PRO S2 – Nodos actuadores

PROPIEDAD	PARÁMETRO (Descripción)
Modem	XBP24-ZB (XBP indica que es tipo Pro y ZB que usa el estándar ZigBee)
Function Set	ZigBee Router/ End Device AT (Configurado como dispositivo final en Modo Comando AT)
Firmware Versión	21A7 (Código del fabricante para la versión de firmware)
PAN ID - 16 bits	0x0000h (Configurado para que se una al nodo coordinador)
Banda de Frecuencia	2.4 GHz
Canal DSSS	15 (Igual canal que el nodo coordinador)
Salida Digital	D4 = 3 (El pin 11 se configura como salida digital inicialmente en bajo, para controlar el acturador– Su máxima corriente de salida es 4mA)
Indicadores de funcionamiento	RSSI = 1 (Habilita el pin 6 como indicador de nivel de señal recibida) ASSOC LED = 1 (Habilita el pin 15 para que indique cuando el módulo se unió a la red)

Los parámetros fueron cargados en el módulo de la misma manera que se hizo con el módulo del nodo coordinador. Su configuración permite que el módulo XBee reciba la señal de control enviada por el coordinador para cambiar el estado de la motobomba y la electroválvula, que gestiona el impulso de agua al cultivo. Esta recepción la hace la unidad de comunicación del módulo y la unidad de procesamiento se encarga de configurar la misma salida digital (D4) usada para los nodos sensores, usando los mismos elementos para acoplarla con el módulo actuador. En el Anexo G se agrega el diagrama circuital de este módulo donde se especifican todos los elementos usados y sus respectivas conexiones.

2.3.4.3 Módulo alimentación eléctrica e interfaces. Para energizar el módulo actuador, se usó 110 VAC conectados a través del disyuntor termomagnético de protección. Para el módulo de comunicación/procesamiento se uso la misma fuente de 12 VDC descrita en los nodos sensores acoplada a través de un regulador de 3.3 VDC. Adicionalmente se usó un regulador de 5 VDC para energizar los LEDs indicadores de funcionamiento y el transistor para el disparo

del optotriac. Para realizar se usó alambre; para el módulo que incluye la motobomba, se utilizó calibre 8 AWG, capaz de manejar una corriente nominal de 22 A; para la distribución de voltaje DC, se usó alambre calibre 14 AWG de iguales características que en el nodo sensor.

2.3.5 Inicialización de red. Una vez configurados los módulos XBee con su respectivo firmware, el coordinador forma la red; por tanto, cuando es energizado éste asigna aleatoriamente una dirección única de 16 bits para identificar la red, denomina *PAN Address*, después, se sintoniza en el canal de frecuencia 15, y permanece a la espera para asociar nuevos dispositivos. Por otro lado, los dispositivos finales (nodos sensores y actuadores) al ser energizados, buscan en el canal 15 un coordinador, al detectarlo, se unen a la red, adquieren su PAN-ID y se les asigna una dirección de identificación de 16 bits para que puedan intercambiar información con el coordinador. Este proceso sucede de forma automática sin intervención del usuario, pero puede verificarse a través de los LEDs indicadores que brillan de forma intermitente cuando los dispositivos finales están asociados a la red⁶⁸.

2.4 FASE IV: DEFINICIÓN Y EJECUCIÓN DE ACCIONES DE CONTROL

Esta fase describe el procedimiento que permitió alcanzar el tercer objetivo de esta investigación, y se centra en el diseño de un software control, que recolecta, despliega y evalúa los datos sensados para determinar dónde, cuándo y cuánto regar. Este software instalado en un computador personal, hace parte del módulo de procesamiento del nodo coordinador, que, dada su funcionalidad también se denomina estación base o remota. El algoritmo de control está diseñado de tal forma que es capaz de gestionar el puerto serial del computador personal (para intercambiar datos con el módulo de comunicaciones a través de la tarjeta XBee Explorer), almacenar y desplegar datos sensados en una interfaz gráfica, y lo más importante, interpretar los datos sensados empaquetados en tramas API.

Cuando los datos son interpretados, éstos son evaluados en las ecuaciones de calibración (halladas en la fase I) para traducir el voltaje del sensor en humedad volumétrica de suelo. Después, los valores de humedad resultantes son analizados para verificar si están dentro de un rango permisible que tiene como límites la CC (capacidad de campo) y UR (umbral de riego), que son determinados a partir de los parámetros hídricos hallados mediante un análisis de suelo. Finalmente, de acuerdo al resultado de dicha evaluación, el software construye una trama API específica, que al ser transmitida configurará el estado de los nodos remotos para que sus actuadores se activen o desactiven, haciendo el control de riego efectivo.

⁶⁸ DIGI, Op. Cit., p. 36-38.

2.4.1 Determinación de rango de humedad volumétrica permisible. Para determinar cuándo iniciar el riego y durante cuánto tiempo mantenerlo activo, es necesario hallar los parámetros hídricos del suelo monitoreado. Como fue mencionado en el marco teórico, a través de la Figura 2, existe un rango en el cual el agua contenida en el suelo, es fácilmente extraíble por las plantas de tal forma que no se sobre esfuerzan para succionarla. Este rango de humedad de suelo, tiene como límites la Capacidad de Campo (CC) y el Umbral de Riego (UR), los cuales son propios de cada suelo y deben hallarse a través de métodos y ecuaciones que relacionan otros parámetros hídricos⁶⁹. Para esta investigación, fue necesario hallar cuatro rangos de humedad permisible, tres para cada uno de los surcos representativos y uno que representara el cultivo total (similar a como se hizo para la calibración de sensores). Todo esto con el fin de comparar el riego sitio-específico y el riego tradicional.

- **Cálculo de CC.** Para determinar la capacidad de campo de cada uno de los surcos representativos de las zonas de manejo y de todo el cultivo, se utilizó el *Método de las Columnas de Chapingo*. Los materiales usados se muestran en la Figura 21. Para simular las columnas de chapingo se utilizaron cuatro mangueras plásticas transparentes de 25cm de longitud y 1" pulgada de diámetro con uno de sus extremos tapado con un trozo de papel filtro, utilizando una banda de caucho para fijarlo.

Figura 21. Materiales usados para determinar CC



⁶⁹ SILVA, Paola, ACEVEDO, Edmundo, SILVA, Herman. Manual de Estudio y Ejercicios. En: Laboratorio Relación Suelo – Agua. Facultad de Agronomía. Universidad de Chile. 2000. p. 5-8.

El procedimiento consistió en tomar cuatro muestras de suelo disturbadas, extraídas de los surcos representativos de cada una de las zonas de manejo, y una muestra representativa de todo el cultivo. Estas fueron secadas en un horno a 105°C durante 48 horas y después filtradas con un tamizador. Luego se procedió a llenar el suelo filtrado en las mangueras plásticas hasta alcanzar los 16 cm de altura, con ayuda de un fino embudo y con un punzón para ir compactando el suelo.

Una vez lleno el suelo en cada columna (manguera), se agregó agua lentamente hasta lograr humedecer el papel filtro. En este estado, las columnas se dejaron reposar durante 48 horas en un lugar ventilado. Cumplido este tiempo, se procedió a cortar con un bisturí 10 cm de la parte central de la columna, para extraer su suelo y pesarla en una balanza. Después de pesada, la porción de suelo fue introducida a un horno de secado a 105°C durante 48 horas, y finalmente, después de secada, fue pesada nuevamente⁷⁰. Este proceso se observa en la Figura 22.

Figura 22. Extracción de suelo central de la Columna de Chapingo



⁷⁰ CARREÑO, María del Rosario, UNIGARRO, Alberto. Metodología para el análisis físico de suelos. En: Métodos químicos para el análisis de suelos. Universidad de Nariño. Colombia. 2005. p. 56-57.

Finalmente para calcular la CC de las cuatro muestras se utiliza la Ecuación 4, donde P_{SH} es el peso neto en gramos del suelo húmedo; P_{SS} es el peso neto en gramos del suelo seco y ∂_a es la densidad aparente del suelo. Los pesos del suelo fueron determinados con el procedimiento descrito anteriormente, y el valor de la humedad aparente, fue calculado a partir de las muestras de suelo usadas para la calibración de los sensores. La Tabla 21 muestra los resultados finales de este procedimiento.

Tabla 21. Capacidad de Campo de zonas de manejo y del cultivo

ZONAS DE MANEJO	SURCO REPRESENTATIVO	P_{SH} (g)	P_{SS} (g)	∂_a (g/cm ³)	$CC (%) = \left(\frac{P_{SH} - P_{SS}}{P_{SS}} \right) * \partial_a * 100$ (Ecuación 4)
Zona Alta	2	51.07	33.27	0.75	40.10
Zona Media	13	53.67	34.82	0.73	39.75
Zona Baja	25	52.95	33.31	0.71	42.05
Cultivo Promedio	Todo Cultivo (15 surcos)	46.66	30.95	0.79	39.97

- **Cálculo de UR.** Para hallar el umbral de riego de cada uno de los surcos representativos de las zonas de manejo y de todo el cultivo, fue necesario hallar algunos parámetros hídricos a partir de la CC encontrada. En el Anexo H, se detallan las ecuaciones usadas para tal fin. Uno de los parámetros más importantes es el nivel de agotamiento permisible NAP , que define básicamente el porcentaje de agua que puede perderse a partir de la CC sin llegar al PMP ⁷¹. Para el caso de las fresas, este porcentaje oscila entre el 15% y 25%, especialmente cuando se usa riego por goteo. Para nuestro caso, fue elegido como NAP el 15% para todas las muestras, lo cual genera un rango estrecho de humedad permisible. Finalmente se resume en la Tabla 24 los rangos de humedad permisibles definidos

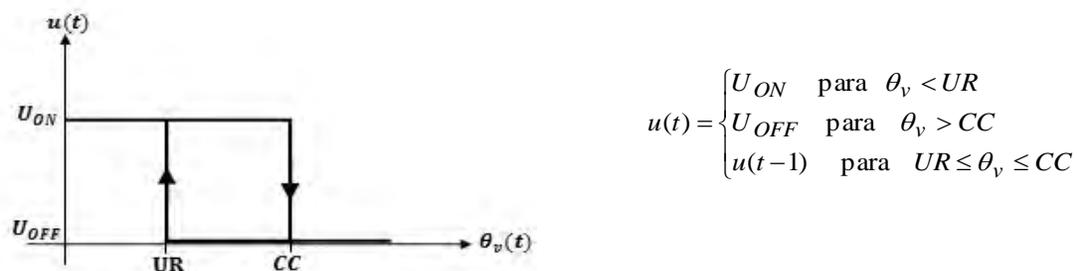
Tabla 22. Rangos de humedad volumétrica permisibles

ZONAS DE MANEJO	SURCO REPRESENTATIVO	RANGO PERMISIBLE (CC , UR) (%)
Zona Alta	2	(40.10 , 37.40)
Zona Media	13	(39.75 , 37.07)
Zona Baja	25	(42.05 , 39.21)
Cultivo Promedio	Todo Cultivo (15 surcos)	(39.97 , 37.27)

⁷¹ PERNAU, Josep Pau. La gestión del agua de riego. En: Gestión eficiente de agua de riego. España. Junio. 2005. p. 9-12.

2.4.2 Acción de control aplicada. Se decidió implementar un control *ON – OFF con banda de histéresis* porque los actuadores usados en la aplicación solamente conmutan a dos posiciones fijas: encendido y apagado; y porque el valor de la humedad volumétrica de referencia ideal para el cultivo, se contempla como un rango acotado por dos parámetros hídricos: CC y UR. Así, cuando el valor de la humedad volumétrica medida por los sensores sobrepase la CC el riego será deshabilitado apagando los actuadores; cuando esté por debajo de UR, el riego será habilitado encendiendo los actuadores; pero cuando esté dentro de la banda de histéresis (rango de humedad permisible), el estado del riego mantendrá su estado presente de tal forma que los actuadores no sufrirán cambio en su estado pues no recibirán ninguna señal de control. La Figura 23 ilustra la banda de histéresis con sus respectivos límites. Donde $u(t)$ es la señal generada por el controlador, $\theta_v(t)$ es la humedad volumétrica en un instante dado; CC es la capacidad de campo; UR es el umbral de riego, U_{ON} y U_{OFF} son las señales en alto y bajo para los actuadores⁷².

Figura 23. Banda de Histéresis y señal de control

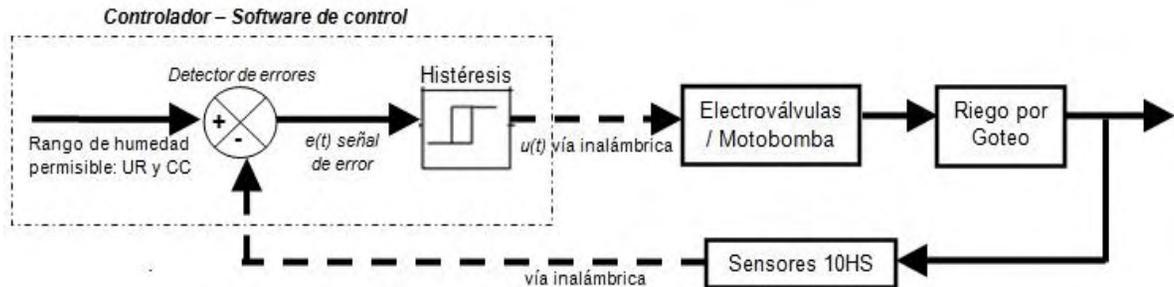


Determinar la acción de control es posible pues el prototipo resultante de esta investigación puede describirse como un sistema de control de lazo cerrado pues está compuesto por: un proceso (riego por goteo), elementos de medición (sensores 10HS), elementos de control final (electroválvulas y motobomba), y un controlador automático (software de control). Todos, conectados de tal manera que se estable un lazo cerrado donde la variable de salida del proceso se mide y se retroalimenta al controlador quien determina el error de dicha medida con su valor de referencia y genera una acción que ejecutan los elementos de control final para ajustar la variable de control al valor deseado, siendo esta variable la humedad volumétrica del suelo. El elemento esencial del sistema de control resulta ser el controlador, pues está encargado de detectar los desvíos del valor medido por los sensores por fuera del rango de humedad permisible, y emitir una señal de corrección hacia los actuadores para que se produzca la acción de control establecida, que para este caso, es la acción de control ON-OFF con

⁷² OGATA, Op. Cit., p. 214.

banda de histéresis. La Figura 24 muestra el diagrama de bloques generalizado del sistema de control equivalente.

Figura 24. Diagrama de bloques general del sistema de control de riego



2.4.3 Diseño de software de control. Como ya ha sido mencionado en el diseño de la red, el software de control forma parte del módulo de procesamiento del nodo coordinador, y debido a las funciones que desempeña, es el controlador automático del sistema que representa el prototipo diseñado. Para su desarrollo se eligió como plataforma de software JAVA, principalmente porque no requiere ningún tipo de licencia y sus herramientas actualizadas pueden adquirirse de forma gratuita para realizar cualquier aplicación. Al ser un lenguaje de programación orientado a objetos, el proceso de diseño radicó en el reconocimiento y manejo de clases para construir objetos que pudieran relacionarse a través de la definición de varios métodos. Otra ventaja no menos importante es su *portabilidad*, pues un programa compilado en Java puede ser utilizado por cualquier computador independientemente de su arquitectura, siempre que tenga instalado el intérprete de código propio de Java, conocido como *máquina virtual*.

Para trabajar con Java se usaron el JDK 1.7 y el IDE NetBeans 7.1. El JDK es un kit de desarrollo que incluye principalmente la API de java, constituida por un conjunto de clases para crear programas básicos; el JRE que es la máquina virtual, el compilado y otras funcionalidades. Por otra parte, se utilizó como interface de desarrollo integral NetBeans 7.1, esto con el fin de programar de forma más rápida y sencilla a través de un ambiente de trabajo gráfico con funcionalidades de editor de texto, debugger para revisar errores, analizador de sintaxis, compilación transparente del programa, entre otros.

- **API(s) y librerías de Java usadas en el diseño.** Para desarrollar un programa en Java, es necesario usar una serie de clases e interfaces acordes con la aplicación que se desea desarrollar. Estas clases están organizadas de acuerdo a su funcionalidad en una estructura denominada Paquete, y varios paquetes forman lo que se conoce como API. El JDK ya

incluye un API por defecto, pero para el diseño, fue necesario usar APIs adicionales, especialmente para gestionar el puerto serial y construir la interfaz gráfica. El Anexo I, muestra una breve descripción de los paquetes usados y su función principal en el programa diseñado.

- **Algoritmo de control.** El algoritmo de control es mostrado en un diagrama de flujo en el Anexo J. Básicamente consiste en la construcción y envío de Tramas API (Tabla 5) hacia los nodos sensores y actuadores para activar la toma de muestras y cambiar el estado de las electroválvulas y la motobomba respectivamente. Las opciones más importantes de riego para la investigación son: Cultivo Total y Surco a Surco; la primera permite activar el riego únicamente en los Surcos representativos de las 3 zonas de manejo (Surco 2, Surco 13 y surco 25) de acuerdo al valor de su humedad de suelo individual, todo esto para analizar el manejo de riego sitio-específico. La segunda permite activar el riego en todo el cultivo de acuerdo al promedio de las mediciones individuales entregada por los tres nodos sensores, todo esto para analizar el manejo de riego tradicional.

En general, fueron creados alrededor de 30 métodos declarando objetos a partir de las clases definidas en el Anexo I. La parte más importante fue el uso de “hilos”, en donde todo el proceso de toma de muestras de humedad de suelo, al ser una tarea robusta que consume muchos recursos del sistema, fue programada en un hilo distinto para que evite el bloqueo del sistema y de la interfaz gráfica en cualquier momento que el usuario desee. La Figura 25 es un ejemplo de una de las Tramas API construidas y organizadas para activar los actuadores de los nodos

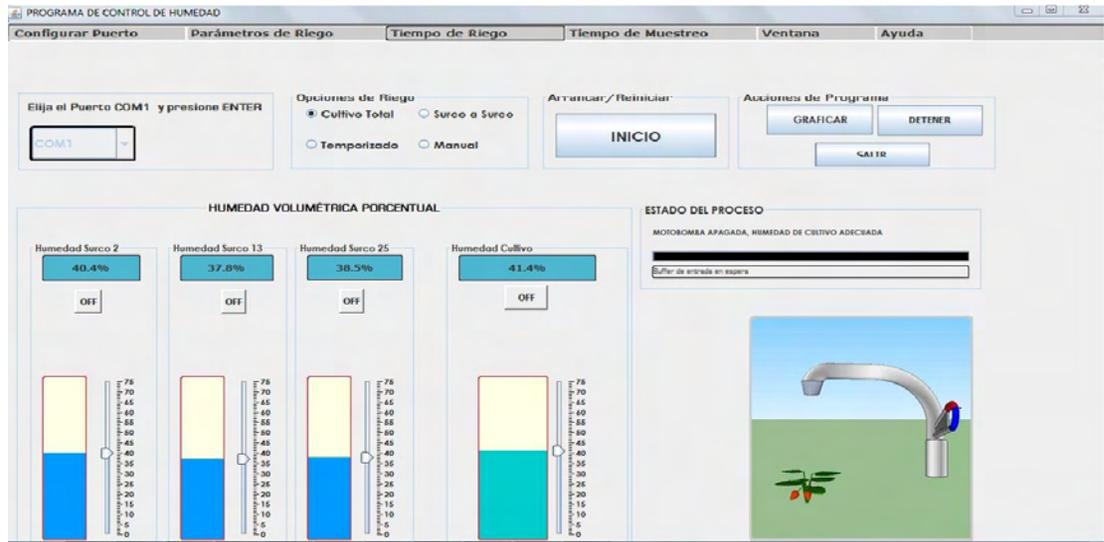
Figura 25. Modelo Trama API para activar actuador – formato hexadecimal

Frame Data (Bytes 4 – n): Remote Command Request								
Frame Type	Frame ID	64- Bit Destination Address (Extended)		16- Bit Destination Network Address		Remote Command Option	AT Command	Command Parameter
Específico	No nulo	Número Serial del módulo Receptor		Dirección de Broadcast				
		MSB	LSB	MSB	LSB	Guardar Configuración	Salida digital DO	Set High salida DO
17	01	0013A200	40614B29	FF	FE	02	4430	05

- **Interfaz gráfica.** La interfaz gráfica diseñada es mostrada en la Figura 26. Esta consta de varias opciones en la que se encuentra elección del puerto serial de conexión del módulo XBee y las opciones de riego. Esta última permite elegir entre los dos principales controles que son: Surco a Surco y Cultivo Total que ya fueron explicados. Se agregaron dos opciones de riego que son Temporizada y Manual, las cuales permiten activar la motobomba y la electroválvula principal para regar todo el cultivo durante un tiempo determinado o simplemente encenderla y apagarla usando el computador personal. Esto fue necesario para que los dueños de la finca pudieran

realizar el fertirriego y controlar la motobomba para regar otros cultivos de la finca.

Figura 26. Interfaz gráfica diseñada



2.5 FASE V: IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

En esta fase se describe el proceso general para implementar la WSNs diseñada, los componentes principales usados y el presupuesto. Todo esto para llevar a cabo el cuarto objetivo de ésta investigación.

2.5.1 Presupuesto. El prototipo diseñado se estima en 4'978.850 como se indica a continuación.

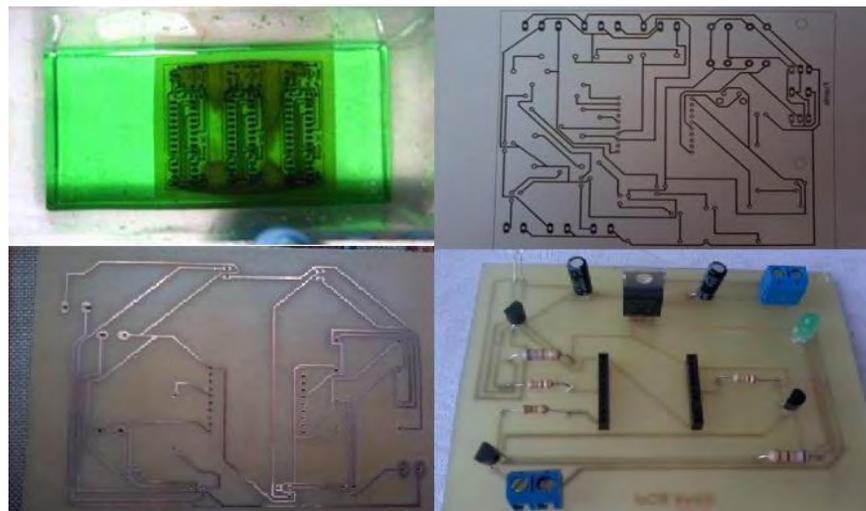
Tabla 23. Presupuesto general

PRESUPUESTO GENERAL	
CONCEPTO	VALOR TOTAL
MÓDULO DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	901100
MÓDULO DE SENSADO	1363500
MÓDULO ACTUADOR	1337000
MÓDULO DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA	115000
ELEMENTOS DE PROTECCION, CABLEADO Y CONEXIÓN.	762250
ELEMENTOS CIRCUITOS VARIOS	200000
IMPREVISTOS	300000
PRESUPUESTO TOTAL	4'978.850

Este valor concentra todos los elementos para el montaje del diseño modular de cada nodo de la red y su conexión a las fuentes de energía eléctrica. Los elementos más destacados son: 4 electroválvulas, 3 sensores 10HS, 6 módulos XBee Pro S2, 8 placas de PCB en fibra de vidrio, 6 cajas plásticas herméticas y aproximadamente 280 m de cable para alimentación eléctrica. El Anexo K detalla los elementos usados y su respectivo precio.

2.5.2 Diseño de circuitos impresos. Para el diseño de las placas de circuito impreso PCB, se eligió el software *EAGLE* de CadSoft versión gratuita, que permite diseñar el circuito esquemático y el respectivo circuito impreso. Para copiar el esquema circuital generado en Eagle en las placas de cobre se usó el método denominado *técnica de transferencia de tonner*, usando una plancha y papel fotográfico. Luego fueron insertadas en cloruro férrico y extraídas para luego ser perforadas y soldadas con los respectivos componentes. La Figura 27 muestra una parte de este proceso.

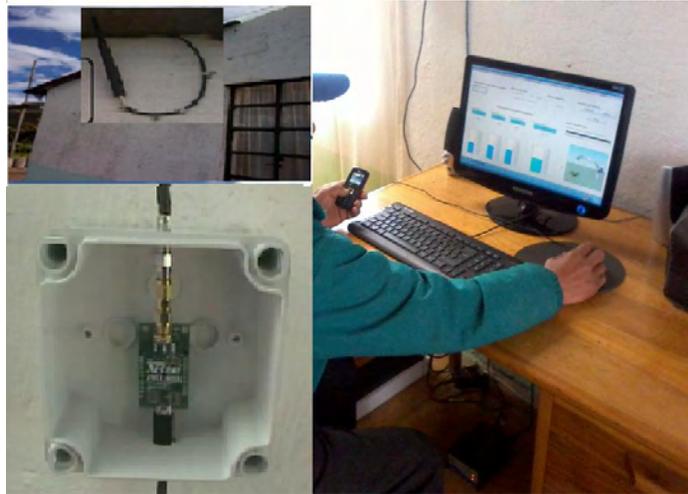
Figura 27. Diseño de PCB



2.5.3 Montaje - Nodo coordinador. El nodo coordinador fue ubicado en la oficina de la finca APROBORCA, donde se encuentra un computador personal con los recursos necesarios para conectar el módulo de comunicaciones XBee en el puerto COM6, e instalar el software de control. Para la puesta en marcha del software fue necesario instalar la versión más actualizada de Java y su máquina virtual *JRE*, copiar la librería *rtxserial.dll* en el directorio *Java/Jre/bin* para luego, simplemente correr el archivo ejecutable del programa diseñado. La Figura 28 muestra algunas imágenes relacionadas a este proceso.

Para la instalación de la antena del módulo de comunicaciones fue necesario conectarla en la parte exterior de la oficina para garantizar línea de vista con los nodos sensores desplegados en el cultivo.

Figura 28. Implementación nodo coordinador



2.5.4 Montaje - Nodos sensores. Cada nodo sensor está conformado por dos circuitos impresos referentes a los módulos que los componen (Anexo F). Estos fueron ubicados en la parte central de los surcos 2, 13 y 25 , protegidos dentro de cajas plásticas herméticas para intemperie y ajustados sobre soportes verticales de 1.50 m de altura, para lograr línea de vista con el nodo coordinador.

Figura 29. Implementación nodos sensores



La Figura 29 muestra los elementos instalados en donde se distinguen tubos conduit que llevan en su interior el cableado de la alimentación eléctrica y el cable del sensor instalado en el surco. La electroválvula de tipo AC de 1/2" normalmente cerrada (NC), correspondiente a cada nodo, fue instalada en el extremo de cada surco donde parten las cintas de goteo, y fue acoplada de tal forma que permitiera habilitar el paso de agua hacia el surco aún con la electroválvula cerrada, a través de llaves de paso manuales. Todo esto para cuando la opción de riego sea Cultivo Total y no Surco a Surco. Respecto a la instalación de sensores, fue la labor que más tiempo tomó, ya que, fue necesario realizar una serie de pruebas previas para determinar en qué posición, vertical u horizontal se tenían mejores resultados. Finalmente se decidió que debían ser ubicados en la parte central del surco, enterrados verticalmente a 20 cm de profundidad, cubriendo los primeros 2 cm de su cable, posicionados justo bajo un emisor de una de las cintas de goteo.

2.5.5 Montaje Nodos actuador - Electroválvula. La Figura 30 muestra imágenes de esta instalación. Fueron diseñadas dos placas de circuito impreso para cada módulo diseñado (Anexo G). Este fue ubicado a 5 m del cabezal de riego del cultivo, protegido dentro de una caja plástica hermética, de mayores dimensiones que la de los nodos sensores. Su soporte vertical de 1.50 m de altura, también para procurar línea de vista con el nodo coordinador. Dentro de la caja, también está incluida la fuente DC de 12 V usada para su propia alimentación eléctrica y la de los tres nodos sensores desplegados en el cultivo. La electroválvula usada es de tipo AC de 1 1/2" normalmente cerrada (NC), y fue instalada a 2 m de la salida del cabezal, en la manguera principal que distribuye el agua a todos los surcos del cultivo.

Figura 30. Implementación Nodo Actuador - Electroválvula



2.5.6 Montaje Nodos actuador - Motobomba. Fueron diseñadas dos placas de circuito impreso para cada módulo diseñado (Anexo G). La Figura 31 muestra el circuito mencionado. Para el caso del circuito del módulo actuador, fue necesario diseñarlo con una pista de 0.7 cm de ancho completamente estañada para soportar los 15 A nominales que fluyen cuando la motobomba está encendida. El circuito fue ubicado dentro de una caja de mando, en la cual también se encuentra el disyuntor termomagnético para proteger el motor de la motobomba, donde todas la conexiones AC fueron hechas con cable calibre 8 AWG.

Figura 31. Implementación Nodo Actuador - Motobomba



2.5.7 Caja de mando. Debido a que la motobomba es el elemento usado para impulsar el flujo de agua hacia todos los cultivos de la finca APROBORCA, fue necesario instalar un mecanismo para que la motobomba pudiera ser usada tanto para el sistema automático diseñado para un solo cultivo como para el riego de todos los demás. Por tal razón se instaló una caja de mando, provista de un selector de tres posiciones en donde es posible elegir tres modos de operación: Automática (manejado por el software de control desde el computador personal); Manual (donde el encendido/apagado de la motobomba lo hace un interruptor On/Off) e Inactivo (donde se desenergiza e inhabilita cualquier modo). Para distinguir entre los modos de operación, la caja de mando posee luces piloto que indican la operación actual de la motobomba. La Figura 32 muestra la caja de mando y el nodo actuador - motobomba incluido. Cabe anotar que antes de seleccionar cualquier modo, deben abrirse las llaves de paso manuales que habilitan el agua desde el reservorio.

Figura 32. Implementación Caja de Mando



2.5.8 Cableado para alimentación eléctrica. Para alimentar las cuatro electroválvulas AC presentes en el cultivo, fue necesario desplegar aproximadamente 70 m de cable calibre 14 AWG, desde la estación base (oficina de la finca), donde está el toma corriente más cercano, hasta el cabezal de riego del cultivo. Para la alimentación DC de los nodos sensores, fue desplegado el mismo tipo de cable, desde la fuente DC, incluida en la caja del nodo actuador – electroválvula, cercana al cabezal hasta cada una de las caja plásticas que incluyen sus circuitos. Para evitar corrosión del cobre, todo el cable fue insertado en más de 30 tubos conduit y metidos bajo tierra para evitar interrupciones en el camino. La Figura 33 muestra el proceso.

Figura 33. Cableado de Alimentación Eléctrica



3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para comprobar el funcionamiento de la WSN en el control del riego por goteo, se llevaron a cabo varias pruebas de funcionamiento realizadas en tres etapas; la primera consistió en probar la distancia de los módulos XBee, la segunda se basó en corroborar la exactitud de los límites de humedad permisible y la tercera probar el sistema completo usando el software de control. Todo esto permitió corregir errores y obtener conclusiones para establecer principalmente la pertinencia y efectividad de un riego sitio específico ante un riego tradicional, a partir del conocimiento del grado de variabilidad de humedad de suelo presente en el cultivo de fresas seleccionado para la investigación.

3.1 DESEMPEÑO DE LA WSN

Con el objetivo de poner en marcha el control automático de riego, fue necesario comprobar la recepción y la transmisión de datos entre todos los nodos de red; inicialmente fue detectado un problema en la comunicación cuando se realizó una prueba de un enlace punto a punto entre un nodo sensor y el nodo coordinador. La comunicación solo se establecía cuando la distancia entre los nodos era menor a 20 m en exteriores garantizando línea de vista. Esto resultaba contradictorio ya que el fabricante de los módulos de comunicación XBee Pro S2 indica un alcance mínimo de 60 m y un máximo de 1500 m. Luego de indagar se pudo establecer que las redes WI-FI cercanas generaban interferencia, pues en su mayoría, usaban un canal que se traslapaba con el canal elegido aleatoriamente por los módulos XBee. Para solucionar este problema, fue seleccionado un canal fijo en todos los módulos XBee en donde se traslapara con la menor cantidad de redes WI-FI en funcionamiento. Después de esta corrección, la comunicación de los WSN fue verificada. El software de control fue manipulado y todos sus elementos respondieron de acuerdo a la funcionalidad programada.

3.2 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE MODOS DE RIEGO

Después de verificar el funcionamiento del software de control, se procedió a analizar los modos de riego más importantes: Surco a Surco y Cultivo Total; todo esto con el fin de analizar el grado de variabilidad de humedad del suelo en el cultivo y verificar la utilidad y pertinencia de un riego de dosis variable. Es necesario aclarar que para realizar las dos pruebas, antes de realizar cada una de ellas, el cultivo fue regado abundantemente y cuatro días después se operó el sistema. Todo esto para garantizar igualdad de condiciones para realizar comparaciones válidas.

3.3.2 Riego sitio-específico – Surco a Surco. Se procedió a analizar el grado de variabilidad de humedad de suelo en el cultivo, a través de las lecturas independientes de cada surco representativo; teniendo en cuenta que estos surcos 2, 13 y 25, son la porción de cultivo que representa a las zonas de manejo definidas como: Alta, Media y Baja respectivamente. Para realizar esta prueba, en la interfaz gráfica, fue seleccionada la opción de riego: Surco a Surco, definiendo un tiempo de muestreo mínimo (12 segundos), considerado como continuo. Una vez definidas las condiciones iniciales, el proceso fue inicializado e inmediatamente los nodos de la WSN empezaron a funcionar intercambiando datos, de tal forma que los valores de humedad volumétrica de cada uno de los surcos fue desplegada en pantalla y se pudo apreciar que todos los surcos estaban por fuera del rango de humedad permisible, por tanto todas las electroválvulas de los nodos sensores se activaron automáticamente para regar su respectivo surco.

El sistema permaneció activo durante 25 minutos, tiempo en el cual todos los surcos alcanzaron su capacidad de campo en instantes distintos. Gracias a la funcionalidad del software de control, todos los datos medidos fueron almacenados en un archivo de Excel y fueron usados para analizar gráficamente los resultados usando Matlab. Las Figuras 34, 35 y 36 muestran el comportamiento de la humedad volumétrica de suelo en cada surco, en dónde se ha identificado la banda de histéresis de control, que usa como límites los parámetros hídricos CC y UR.

Figura 34. Riego sitio-específico - Surco 2

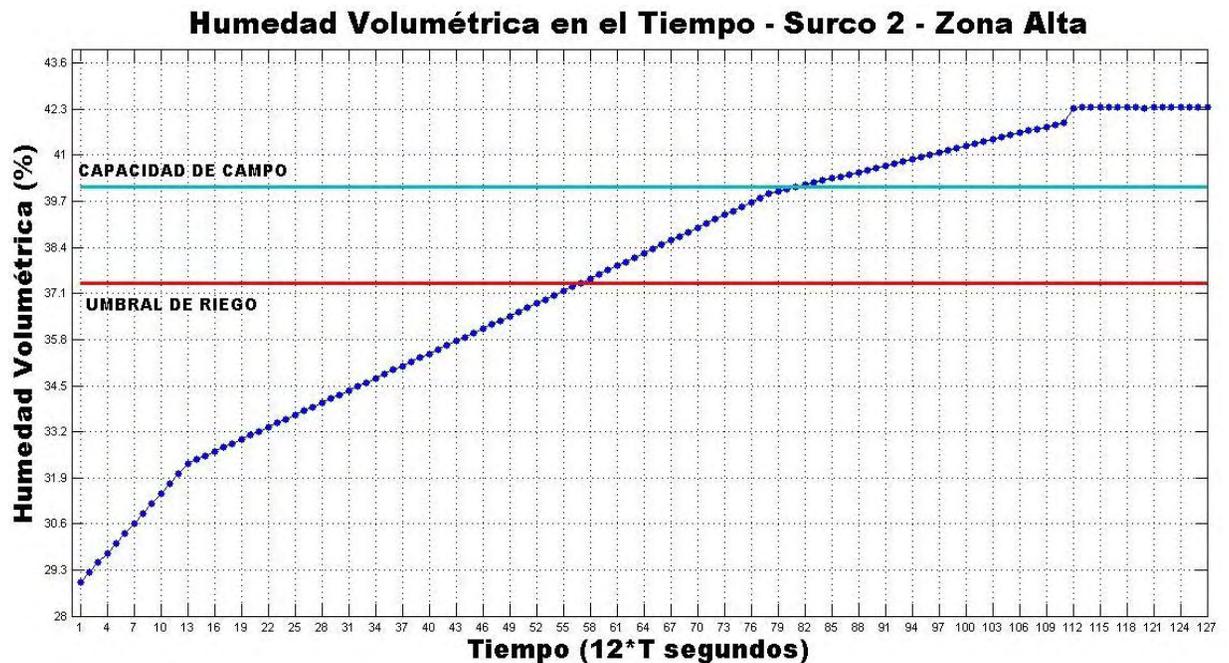


Figura 35. Riego sitio-específico - Surco 13

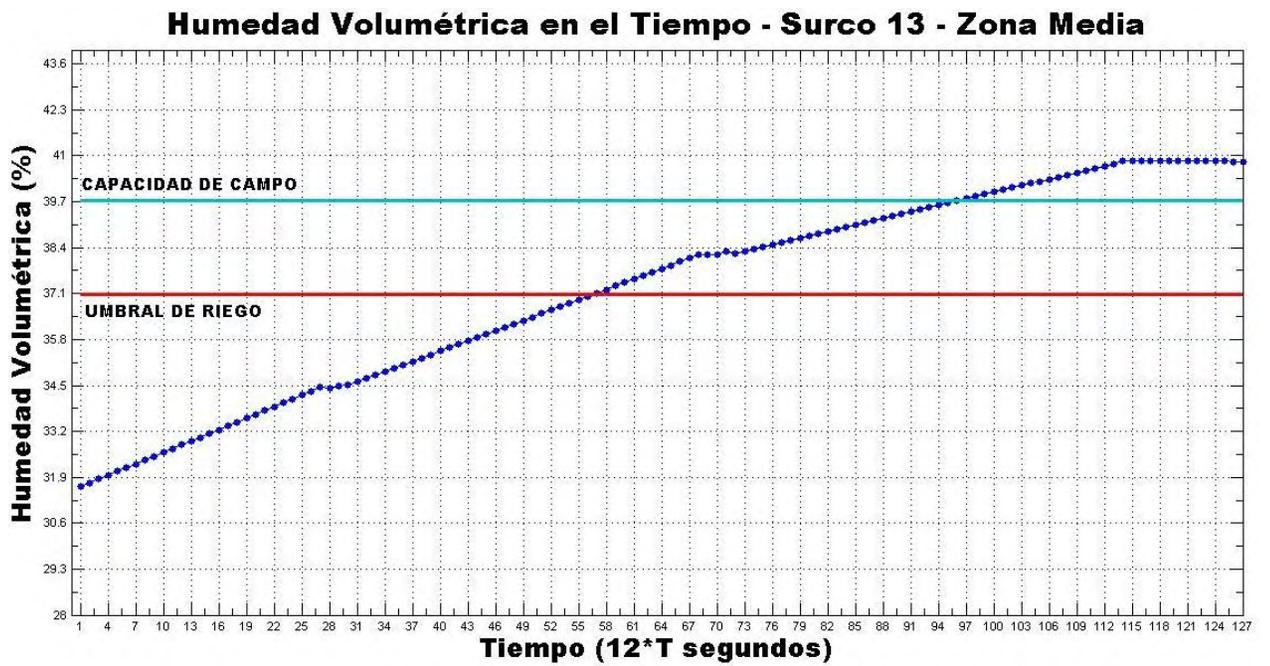


Figura 36. Riego sitio-específico - Surco 25

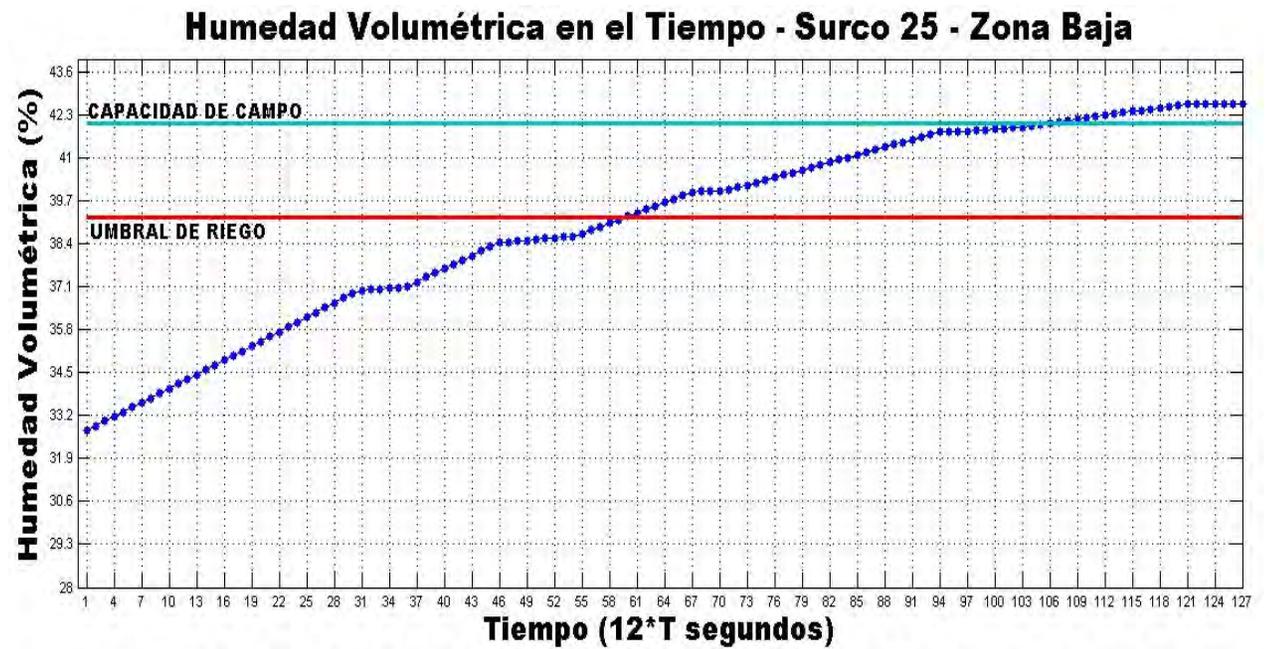


Tabla 24. Análisis de riego sitio -específico

SURCO	RANGO PERMISIBLE (CC , UR) (%)	$\theta_{V\text{INICIAL}}$	Tiempo de Riego	$\theta_{V\text{FINAL}}$
2	(40.10 , 37.40)	28.9%	10 min	42.4%
13	(39.75 , 37.07)	31.6%	17 min	40.8%
25	(42.05 , 39.21)	32.8%	19 min	42.7%

La Tabla 24 hace referencia a las características más importantes que expresan las gráficas anteriores. Es evidente que el cultivo presenta una variabilidad de humedad de suelo, expresada a través de los tres surcos analizados. Se puede observar que al encender el sistema las humedades son distintas en todos los surcos, siendo el surco 2 el que presenta una menor humedad, pero siendo el que menor tiempo de riego requiere, pues adquiere rápidamente su capacidad de campo.

3.2.2 Riego tradicional – Cultivo Total. Al inicializar el sistema, fue detectado un bajo nivel de humedad volumétrica promedio en el cultivo, razón por la cual el riego se activo inmediatamente para todos los surcos encendiendo la motobomba y la electroválvula principal. De igual manera el sistema permaneció activo durante 25 minutos, tiempo en el cual el cultivo alcanzó su capacidad de campo; en este caso, todos los datos medidos también se almacenaron en un archivo de Excel y permitieron la grafica mostrada en la Figura 37, en dónde se ha identificado la banda de histéresis de control que usa como límites los parámetros hídricos CC y UR.

Siguiendo la Figura 37, la Tabla 25 muestra el comportamiento de todo el cultivo en dónde se observa que su humedad de suelo no resulta ser ajena a las humedades de suelo individuales de los surcos (visto en la Tabla 24), y de hecho resulta ser muy parecida. En cuanto al tiempo de riego, tampoco resulta presentar diferencias extremas, excepto si se compara con el surco 2. Puede concluirse que el riego sitio especifico es comparable con el riego tradicional, pues a pesar que se reconoce la variabilidad espacial de humedad de suelo, esta no es altamente significativa.

Figura 37. Riego tradicional - Cultivo Total

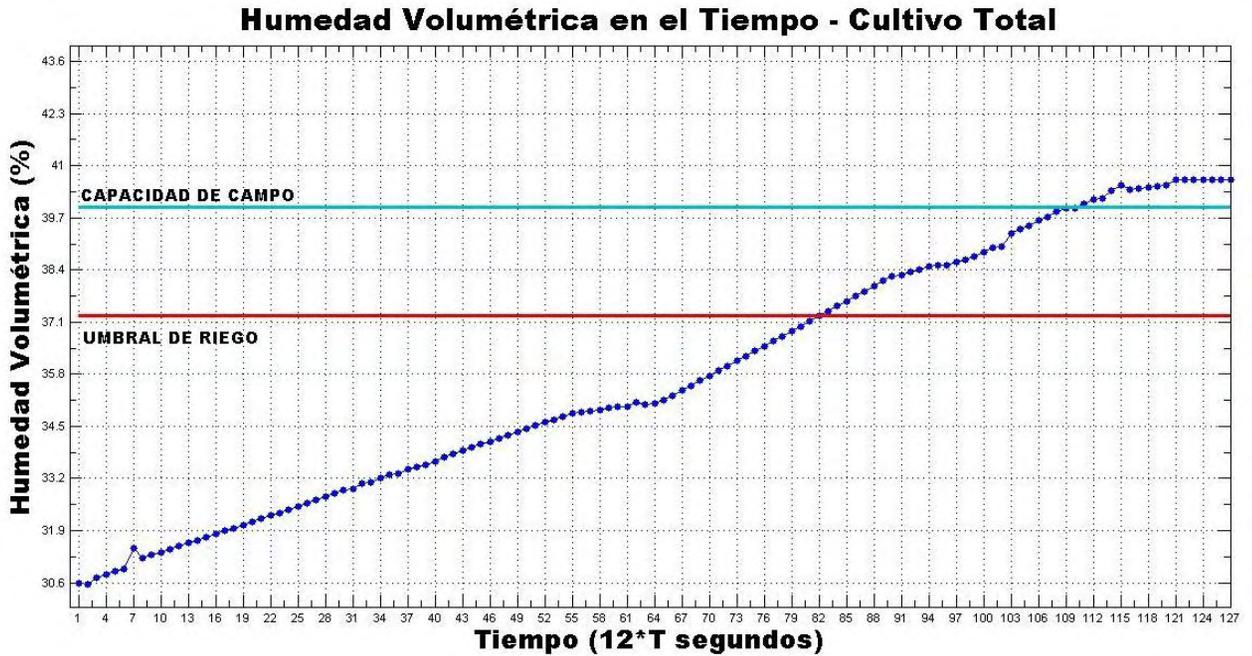


Tabla 25. Análisis de riego tradicional

SURCO	RANGO PERMISIBLE (CC , UR) (%)	$\theta_{V\text{INICIAL}}$	Tiempo de Riego	$\theta_{V\text{FINAL}}$
Cultivo Promedio	(39.97 , 37.27)	30.6%	19 min	40.7%

3.3 PRUEBAS DE COBERTURA E INICIACIÓN DE RED

Teniendo en cuenta que el cultivo se encuentra situado a una distancia de 70 metros de la estación base, se hicieron pruebas de transmisión y recepción de datos con los módulos XBee Pro S2 para evaluar su alcance, de las cuales se pudo determinar que la comunicación se establecía hasta los 100 metros de distancia en interiores y 150 metros con línea de vista. De igual manera, fue posible determinar el tiempo que tardan todos los nodos, tanto sensores y actuadores, en asociarse al coordinador. Este tiempo está entre 1 y 2 minutos, lo cual fue corroborado gracias a los LEDs indicadores de asociación que tienen implementado todos los nodos sensores y actuadores en su circuito impreso.

3.4 PRUEBAS DE INSTALACIÓN DE SENSORES

Al momento de instalar los sensores en el terreno, fue determinante definir cuál era la mejor orientación para enterrarlos en el suelo, si horizontal o verticalmente.

El fabricante indica que las dos formas son válidas sin embargo se optó por estudiar su comportamiento en estas dos posiciones; para esto se enterraron dos sensores en el mismo surco en las posiciones mencionadas (uno de forma vertical y el otro de forma horizontal), luego, se realizó un riego de 10 minutos para observar la respuesta de los sensores a las variaciones de humedad que se iba presentando a medida que el tiempo transcurría. En cada minuto que pasaba, se pudo mirar que el sensor enterrado de manera vertical presentaba una respuesta más rápida ante los cambios de humedad que el sensor enterrado horizontalmente, razón por la cual se decidió implementar todos los sensores verticalmente.

3.5 CONFIABILIDAD DE LÍMITES HÍDRICOS PARA CONTROL DE RIEGO

Al ser la capacidad de campo el parámetro hídrico más importante para definir el rango permisible de humedad de suelo, fue necesario comprobar la veracidad del valor encontrado a través del método explicado en la FASE IV, fue solicitada una prueba de suelos en el laboratorio especializado de la Universidad de Nariño. Para esto, fue necesario tomar muestra disturbada a 20 cm de profundidad de varios surcos del cultivo de fresas. Después de recolectar 2 Kg de suelo, la muestra fue llevada al laboratorio para su respectivo análisis. Después de casi un mes de espera, los resultados arrojaron un valor de capacidad de campo para todo el cultivo de 39.22%, que, al ser comparado con el valor encontrado como valor de capacidad de campo experimentalmente, no presentó mayor diferencia, pues nuestro resultado fue 39.97% también para todo el cultivo. Esto brinda una gran confianza a los resultados obtenidos para cada uno de los tres surcos y una base sólida para garantizar un control de riego preciso.

4. RECOMENDACIONES

En el proceso de instalación del sensor 10HS es necesario verificar, que independientemente de su orientación, el dispositivo debe ser enterrado en el suelo hasta cubrir por lo menos los dos primeros centímetros de su cable de conexión, de tal forma que el plástico negro superior, en donde se encuentra sellado su circuito de funcionamiento quede cubierto. Esto es importante pues fue comprobado que cuando éste está parcialmente cubierto o por fuera del suelo el voltaje entregado por el sensor es inestable y su valor no resulta proporcional a la humedad volumétrica del sitio medido.

En la configuración de los módulos XBee, es siempre mejor elegir un canal de comunicaciones fijo, que dejar su configuración predeterminada para que el módulo coordinador elija uno de los canales disponibles. Esto es necesario, especialmente cuando existen redes WI-FI cercanas que puedan interferir con la red ZigBee.

Debido a que una de las características principales del estándar ZigBee, es el bajo consumo de energía, es recomendable utilizar esta característica para crear redes con nodos autónomos en su alimentación eléctrica, que usen como fuente baterías recargables, paneles solares o cualquier otro tipo de energía renovable.

En cuanto a los diseños de las placas de circuito impreso, se recomienda seguir las normas como el ancho y separación de las pistas de acuerdo a los niveles de corriente y voltaje que se van a manejar, para evitar el desprendimiento de las mismas y problemas con su funcionamiento.

Continuar como línea de investigación las redes de sensores inalámbricas que puedan controlar otro tipo de variables que influyan la salud humana como por ejemplo los niveles de contaminación en sitios cerrados o niveles de radiación solar, que alerten a las personas y puedan tomar medidas y precauciones al respecto.

5. CONCLUSIONES

La calibración de sensores de humedad de suelo es una tarea indispensable al desarrollar una para controlar el riego en un cultivo. A pesar que los sensores comerciales traen consigo una ecuación de calibración predefinida, una calibración particular para cada cultivo es necesaria, ya que la textura, estructura, presencia de materia orgánica y niveles de salinidad son distintos en cada suelo e influyen el proceso de evapotranspiración y la rapidez de absorción de agua que definen cuándo el riego debe ser aplicado.

Para el caso del cultivo de fresas estudiado, se pudo verificar que existe un grado de variabilidad espacial de humedad de suelo, pero que no resulta ser altamente significativo para aplicar las prácticas de la agricultura de precisión en el manejo de riego, sin embargo, es justificable el despliegue de una red de sensores inalámbrica para tener una caracterización de humedad de suelo promedio mucho más precisa, que permita definir bajo un criterio técnico cuánto y cuándo regar.

Fue posible diseñar e implementar una red de sensores inalámbrica para monitorear continuamente el nivel de humedad de suelo que impide el déficit o exceso de agua en un cultivo de fresas, que evita el desperdicio de agua y que permite que uno de los insumos agrícolas más importantes, como es el caso de los fertilizantes, puedan ser absorbidos fácilmente por las plantas al garantizar que el suelo esté dentro de un rango de humedad permisible, muy por encima de su punto de marchitez permanente y muy cerca a su capacidad de campo.

El desarrollo de proyectos que involucren el desarrollo rural, resulta ser un instrumento que permite concientizar al agricultor local de la necesidad de involucrar herramientas tecnológicas en sus predios por los beneficios que estas brindan, entre los cuales se destacan el incremento de calidad de sus productos, la distribución eficiente de insumos, mayor retribución económica y alta competitividad en el mercado.

Desde la Ingeniería electrónica fue posible desarrollar un proyecto interdisciplinar e innovador que involucró el concepto de agricultura de precisión para el manejo de riego en los cultivos locales. Gracias al diseño de un sistema automático ideado bajo las premisas de la resolución de un problema de ingeniería, fue posible reconocer el grado de la variabilidad espacial de humedad de suelo en un cultivo de fresas para determinar la pertinencia de la agricultura de precisión en un caso particular, permitiendo así marcar un precedente en esta área de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

SAC, Sociedad de agricultores de Colombia. Agricultura de Precisión AP. En: Revista Nacional de Agricultura. Junio, 2007.

LEÓN, Lorenzo. Manejando la Variabilidad. En: Handbook Agricultura de Precisión. Chillán, Chile, 2011.

ZHANG, Naiqian, WANG Maohua, WANG Ning. Precision agriculture: a worldwide overview. En: Computers and Electronics in Agriculture. Noviembre, 2002. Vol. 36.

SEGURA, Luis, TORRES, Sandra, VELEZ, Juana, CORREA, Sandra, VARGAS, Gustavo, PEREZ, Paola. Ejercicio EAD Agricultura de Precisión. Informe de Vigilancia Tecnológica. Santiago de Cali. Universidad del Valle, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. Facultad de Ciencias de la Administración, 2010.

MUÑOZ, Fernando. Importancia del agua en la nutrición de cultivos. En: Carta Trimestral, Cenicaña. 2009. vol. 31. nos. 3 y 4.

WWF, España. El agua en la agricultura. En: Manual de buenas prácticas de riego. Octubre, 2009.

CHÁVARRI, Eduardo. Evapotranspiración. Curso: Hidrología Aplicada. Lima. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola. Abril, 2004.

ENCISO, Juan, PORTER, Dana y PERIES, Xavier. Conceptos básicos. En: Uso de sensores de humedad de suelo para eficientizar el riego. Sistema Universitario Texas A&M, 2007.

PEREIRA, Luis, VALERO, José, BUENDÍA, María y TARJUELO, José. Riego localizado. En: El riego y sus tecnologías. Marzo, 1 Ed. 2010

ROJAS. Rafael. Relaciones Suelo – Agua . En: Las relaciones agua suelo planta atmósfera en planificación, diseño y manejo de proyectos de aguas y tierras. Centros de estudios forestales y ambientales de postgrado. ULA. Mérida.

MUÑOZ, Rafael y RITTER Axel. Medida de la humedad del suelo. En: Hidrología agroforestal. 2005.

DECAGON, Devices Inc. 10HS Soil Moisture Sensor. En: Operator's Manual Version 1.0. 2008.

DARGIE, Waltenegus y POELLABAUER, Christian. Motivation for a Network of Wireless Sensor Nodes. En: Fundamentals of Wireless Sensor Networks. Theory and Practice. 1 Ed. Reino Unido. 2010.

SOHRABY, Kazem, MINOLI, Daniel y ZNATI, Taieb. Introduction and Overview of Wireless Sensor Network. En: Wireless Sensor Networks. Technology, Protocols and Applications. USA. 2007.

FERNÁNDEZ, Roberto, ORDIERES, Joaquín, MARTÍNEZ, Francisco, GONZALES, Ana, et al. Redes Inalámbricas de sensores. En: Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación. Práctica. España. 2009.

ILYAS, Mohammad y MAHGOUB, Imad. A Practical Perspective on Wireless Sensor Networks. En: Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems. USA. 2005.

IEEE, Computer Society. Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). En: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Junio, 2011.

KOUBAA, Anis, ALVES, Eduardo y TOVAR Eduardo. IEEE 802.15.4 for Wireless Sensor Network: A Technical Overview. Julio, 2005.

ACEDO, Alfredo, MOLINA, María, ORTIGOZA, Ramón. Revisión del proceso de identificación de nodos en las Wireless Sensor Networks. Septiembre, 2008.

SUÁRES, Pablo. Reducción del consumo de energía del protocolo ZigBee implementando un protocolo MAC de bajo consumo. Trabajo de Grado. Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros. 2008.

MORENO, Javier y RUÍZ, Daniel. Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4). España. Junio, 2007.

VALVERDE, Jorge. El estándar Inalámbrico ZigBee. Perú. 2007. P. 3-6.

ZHOU, Yiming, YANG, Xianglong, WANG, Liren, YING y Yibin. A wireless design of low- cost irrigation system using ZigBee technology. En: International Conference on Networks Security. 2009.

PERNAU, Josep Pau. La gestión del agua de riego. En: Gestión eficiente de agua de riego. España. Junio. 2005.

HERNÁNDEZ, Libardo, PINEDA, William y BAYONA, Dariel. Sistema de control de humedad y temperatura para invernaderos. En: Universidad Pedagógica y Tecnológica y de Colombia. 2009

AGUDELO, Rodolfo, CASTELLANOS Giovanini y MEDINA, Mauricio. Automatización de sistema de riego para el cultivo de flores tipo exportación. En: Pontificia Universidad Javeriana.

LÓPEZ, J.A, SOTO, F, SUARDÍAZ, J, IBORRA, A. Red de Sensores Inalámbrica para Agricultura de Precisión. En: Universidad Politécnica de Cartagena. 2011.
ZAPATA, Carlos y SÁNCHEZ, Andrés. Sistema Inalámbrico para la Supervisión de las Variables Ambientales de un Invernadero. En: Universidad del Quindío, 2010.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Traducido por Miguel Ángel Martínez Ramírez. Ed 3. México. 1998.

COBOS, Doug. 10HS Volume of Sensitivity. En: Application Note, Decagon devices. 2008.

CAMPOS, Daniel. Ajustes de Curvas - Regresión y correlación polinomial. En: Introducción a los métodos numérico: Software en Basic y Aplicaciones en Hidrología Superficial. Noviembre. 2002.

FALUDI, Robert. Getting Ready En: Building Wireless Sensor Networks. USA. 2010.

DIGI, International Inc. API Operation. En XBee/XBee PRO ZB RF Modules. 2012.

ON SEMICONDUCTOR, Triac Theory. En: Thyristor theory and desing configuration, HandBook. Noviembre. 2006.

TECCOR, Electronics. Thyristors used as AC static switches and relays. En: Application Note AN1007. 2002.

SILVA, Paola, ACEVEDO, Edmundo, SILVA, Herman. Manual de Estudio y Ejercicios. En: Laboratorio Relación Suelo – Agua. Facultad de Agronomía. Universidad de Chile. 2000.

CARREÑO, María del Rosario, UNIGARRO, Alberto. Metodología para el análisis físico de suelos. En: Métodos químicos para el análisis de suelos. Universidad de Nariño. Colombia. 2005.

VALDEVERDE, Juan Carlos. Requerimientos de riego. En: Riego y Drenaje. 2007. p. 94-97. (Ecuaciones y lo del NAP)

ANEXOS

Anexo A. Datos recolectados y evaluados para calibración

Los datos recolectados de cada muestra de suelo contienen los siguientes parámetros:

- P_M : Es el peso en gramos de la muestra húmeda incluyendo el peso adicional P_A .
- P_A : Es el peso adicional en gramos que acompaña a la muestra (peso del sensor más el peso del tubo de PVC contenedor de la muestra)
- P_{SH} : Es el peso neto en gramos de la muestra húmeda de suelo
- P_{SS} : Es el peso neto en gramos de la muestra completamente seca
- ρ_w : Es la densidad del agua
- V_w : Es el volumen de agua contenido en la muestra de suelo
- r : Es el radio en centímetros del tubo de PVC contenedor de la muestra de suelo. Siendo el diámetro de tubo de 6 pulgadas.
- L : Es la altura en centímetros que alcanza el suelo en el tubo de PVC
- V_T : Es el volumen en cm³ del tubo de PVC que contiene la muestra considerado como un cilindro.
- θ_v : Humedad volumétrica porcentual de la muestra
- v : Voltaje del sensor de humedad de suelo instalado en la muestra.

Para determinar cada valor, fueron promediadas cinco mediciones para lograr mayor precisión.

- Datos recolectados a partir de la muestra del surco 2

ZONA ALTA - SURCO 2											
Día	P_M (g)	P_A (g)	$P_{SH} = P_M - P_A$ (g)	P_{SS} (g)	$\hat{\rho}_w$ (g/cm ³)	$V_w = \frac{P_{SH} - P_{SS}}{\hat{\rho}_w}$ (cm ³)	r (cm)	L (cm)	$V_T = \Pi * r^2 * L$ (cm ³)	$\theta_v = \frac{V_w}{V_T} * 100$ (%)	V (mV)
1	4769.00	415.00	4354.00	2727.33	1.00	1626.67	7.62	20.00	3648.29	44.59	1079.60
2	4752.00	415.00	4337.00	2727.33	1.00	1609.67	7.62	20.00	3648.29	44.12	1068.20
3	4740.00	415.00	4325.00	2727.33	1.00	1597.67	7.62	20.00	3648.29	43.79	1060.20
4	4606.00	415.00	4191.00	2727.33	1.00	1463.67	7.62	20.00	3648.29	40.12	1010.60
5	4602.00	415.00	4187.00	2727.33	1.00	1459.67	7.62	20.00	3648.29	40.01	999.80
6	4533.00	415.00	4118.00	2727.33	1.00	1390.67	7.62	20.00	3648.29	38.12	961.20
7	4483.00	415.00	4068.00	2727.33	1.00	1340.67	7.62	20.00	3648.29	36.75	941.20
8	4442.00	415.00	4027.00	2727.33	1.00	1299.67	7.62	20.00	3648.29	35.62	926.00
9	4362.00	415.00	3947.00	2727.33	1.00	1219.67	7.62	20.00	3648.29	33.43	894.00
10	4311.00	415.00	3896.00	2727.33	1.00	1168.67	7.62	20.00	3648.29	32.03	871.00

- Datos recolectados a partir de la muestra del surco 13

ZONA MEDIA - SURCO 13											
Día	P_M (g)	P_A (g)	$P_{SH} = P_M - P_A$ (g)	P_{SS} (g)	ρ_w (g/cm ³)	$V_w = \frac{P_{SH} - P_{SS}}{\rho_w}$ (cm ³)	r (cm)	L (cm)	$V_T = \Pi * r^2 * L$ (cm ³)	$L_{\theta_v} = \frac{V_w}{V_T} * 100$ (%)	V (mV)
1	4764.00	412.00	4352.00	2680.00	1.00	1672.00	7.62	20.00	3648.29	45.83	45.83
2	4721.00	412.00	4309.00	2680.00	1.00	1629.00	7.62	20.00	3648.29	44.65	44.65
3	4680.00	412.00	4268.00	2680.00	1.00	1588.00	7.62	20.00	3648.29	43.53	43.53
4	4577.00	412.00	4165.00	2680.00	1.00	1485.00	7.62	20.00	3648.29	40.70	40.70
5	4452.00	412.00	4040.00	2680.00	1.00	1360.00	7.62	20.00	3648.29	37.28	37.28
6	4408.00	412.00	3996.00	2680.00	1.00	1316.00	7.62	20.00	3648.29	36.07	36.07
7	4356.00	412.00	3944.00	2680.00	1.00	1264.00	7.62	20.00	3648.29	34.65	34.65
8	4250.00	412.00	3838.00	2680.00	1.00	1158.00	7.62	20.00	3648.29	31.74	31.74
9	4184.00	412.00	3772.00	2680.00	1.00	1092.00	7.62	20.00	3648.29	29.93	29.93
10	4140.00	412.00	3728.00	2680.00	1.00	1048.00	7.62	20.00	3648.29	28.73	28.73

- Datos recolectados a partir de la muestra del surco 25

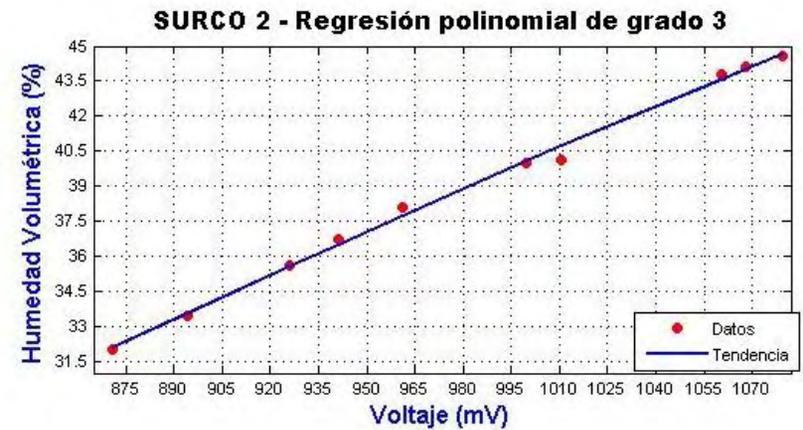
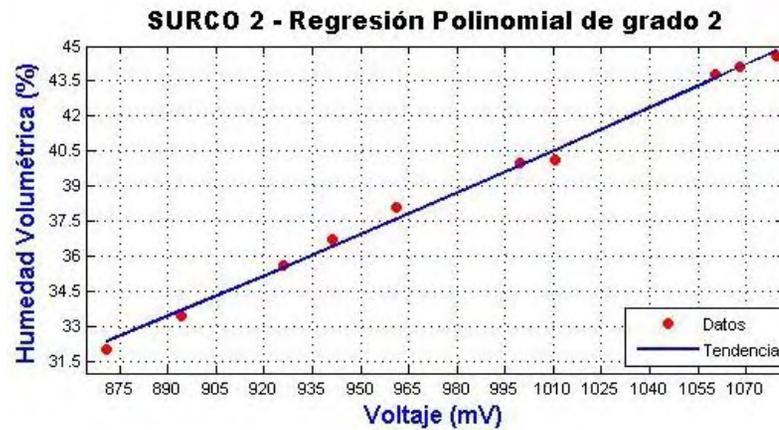
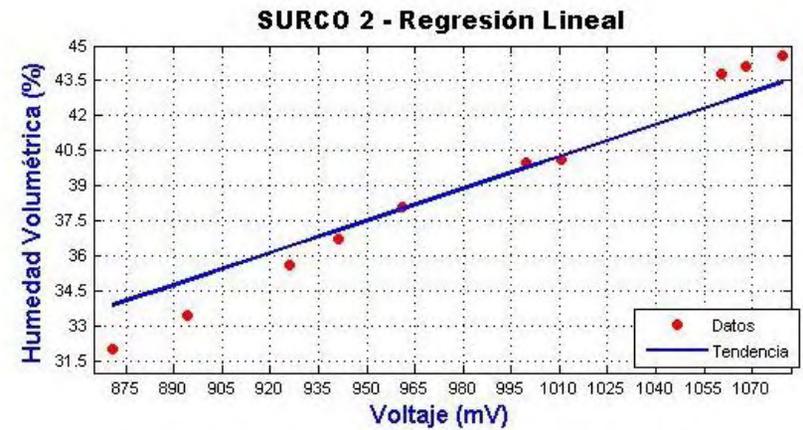
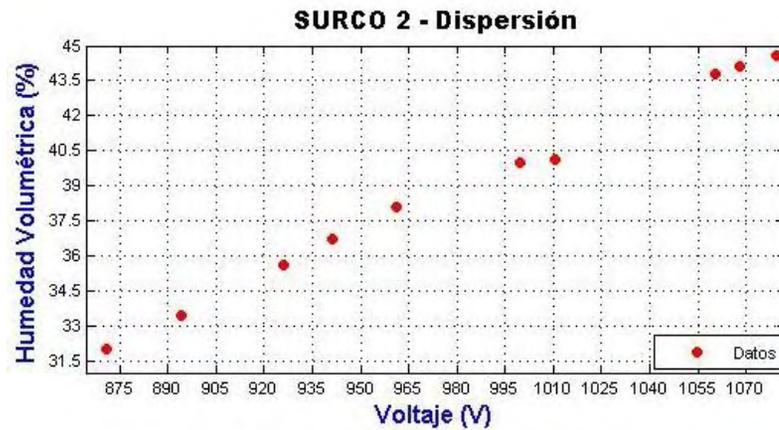
ZONA BAJA - SURCO 25											
Día	P_M (g)	P_A (g)	$P_{SH} = P_M - P_A$ (g)	P_{SS} (g)	ρ_w (g/cm ³)	$V_w = \frac{P_{SH} - P_{SS}}{\rho_w}$ (cm ³)	r (cm)	L (cm)	$V_T = \Pi * r^2 * L$ (cm ³)	$\theta_v = \frac{V_w}{V_T} * 100$ (%)	V (mV)
1	4659.00	415.00	4244.00	2602.00	1.00	1642.00	7.62	20.00	3648.29	45.01	45.01
2	4652.00	415.00	4237.00	2602.00	1.00	1635.00	7.62	20.00	3648.29	44.82	44.82
3	4586.00	415.00	4171.00	2602.00	1.00	1569.00	7.62	20.00	3648.29	43.01	43.01
4	4490.00	415.00	4075.00	2602.00	1.00	1473.00	7.62	20.00	3648.29	40.38	40.38
5	4444.00	415.00	4029.00	2602.00	1.00	1427.00	7.62	20.00	3648.29	39.11	39.11
6	4416.00	415.00	4001.00	2602.00	1.00	1399.00	7.62	20.00	3648.29	38.35	38.35
7	4268.00	415.00	3853.00	2602.00	1.00	1251.00	7.62	20.00	3648.29	34.29	34.29
8	4229.00	415.00	3814.00	2602.00	1.00	1212.00	7.62	20.00	3648.29	33.22	33.22
9	4109.00	415.00	3694.00	2602.00	1.00	1092.00	7.62	20.00	3648.29	29.93	29.93
10	4091.00	415.00	3676.00	2602.00	1.00	1074.00	7.62	20.00	3648.29	29.44	29.44

- Datos recolectados a partir de la muestras que caracteriza a todo el cultivo

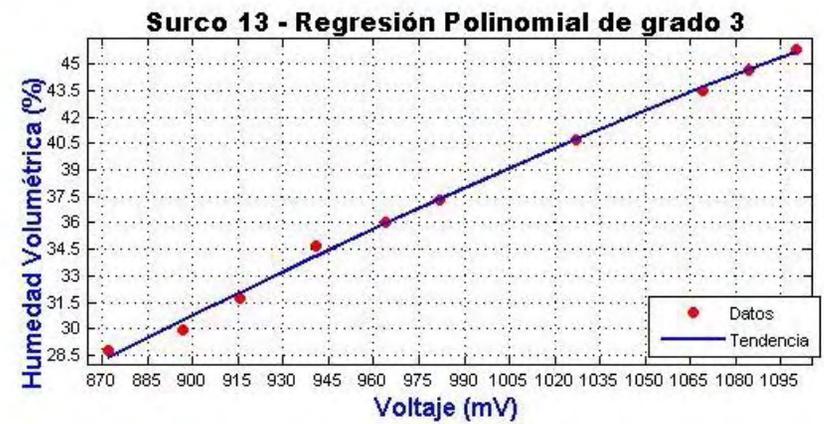
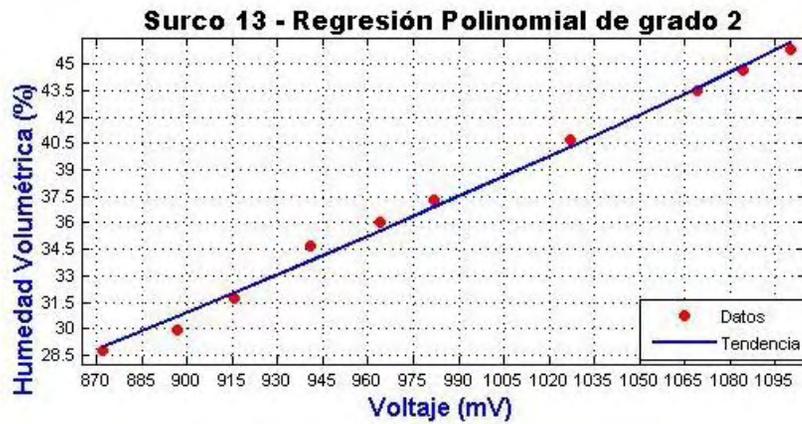
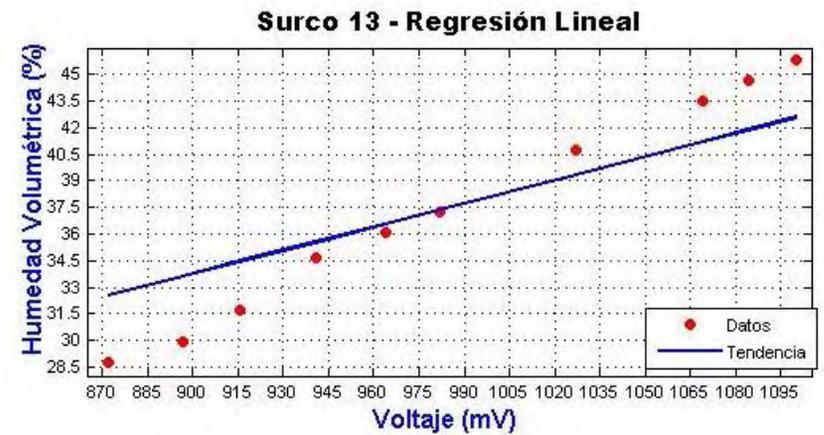
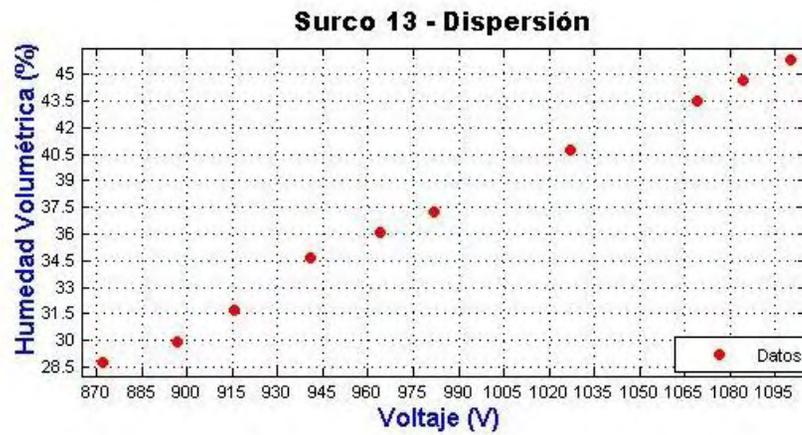
TODO CULTIVO – 15 SURCOS											
Día	P_M (g)	P_A (g)	$P_{SH} = P_M - P_A$ (g)	P_{SS} (g)	∂_w (g/cm ³)	$V_w = \frac{P_{SH} - P_{SS}}{\partial_w}$ (cm ³)	r (cm)	L (cm)	$V_T = \Pi * r^2 * L$ (cm ³)	$L_{\theta_v} = \frac{V_w}{V_T} * 100$ (%)	V (mV)
1	5015.00	415.00	4600.00	2872.00	1.00	1728.00	7.62	20.00	3648.29	47.36	47.36
2	4996.00	415.00	4581.00	2872.00	1.00	1709.00	7.62	20.00	3648.29	46.84	46.84
3	4899.00	415.00	4484.00	2872.00	1.00	1612.00	7.62	20.00	3648.29	44.19	44.19
4	4768.00	415.00	4353.00	2872.00	1.00	1481.00	7.62	20.00	3648.29	40.59	40.59
5	4737.00	415.00	4322.00	2872.00	1.00	1450.00	7.62	20.00	3648.29	39.74	39.74
6	4703.00	415.00	4288.00	2872.00	1.00	1416.00	7.62	20.00	3648.29	38.81	38.81
7	4617.00	415.00	4202.00	2872.00	1.00	1330.00	7.62	20.00	3648.29	36.46	36.46
8	4539.00	415.00	4124.00	2872.00	1.00	1252.00	7.62	20.00	3648.29	34.32	34.32
9	4481.00	415.00	4066.00	2872.00	1.00	1194.00	7.62	20.00	3648.29	32.73	32.73
10	4396.00	415.00	3981.00	2872.00	1.00	1109.00	7.62	20.00	3648.29	30.40	30.40

Anexo B. Diagramas de dispersión y regresiones

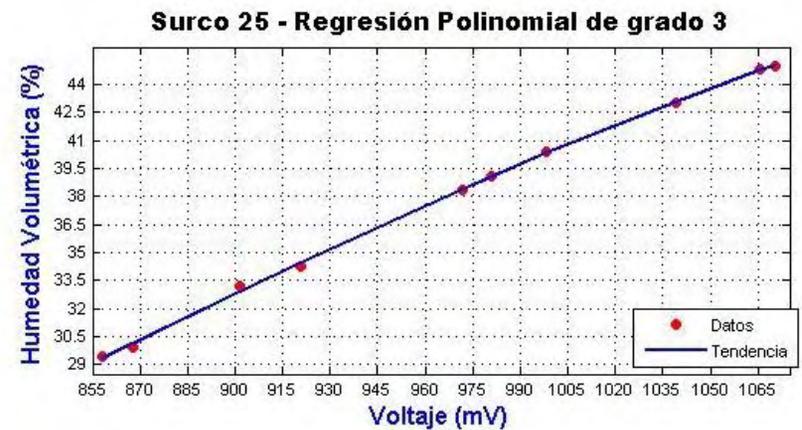
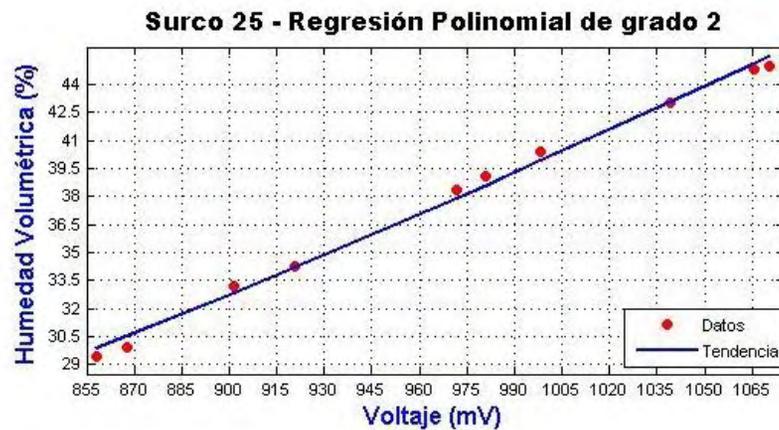
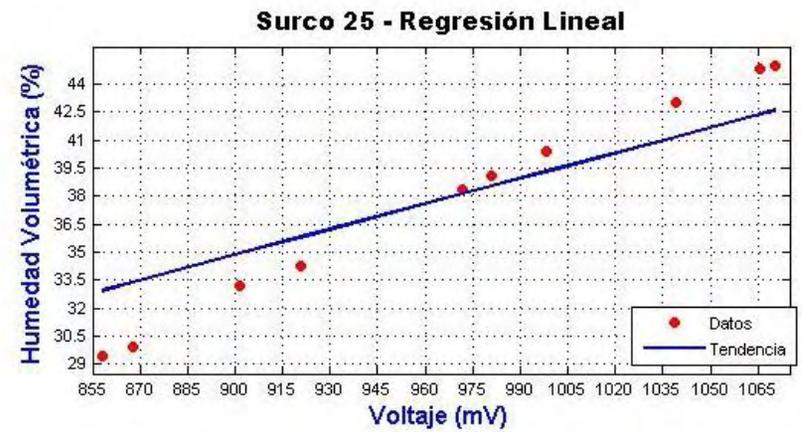
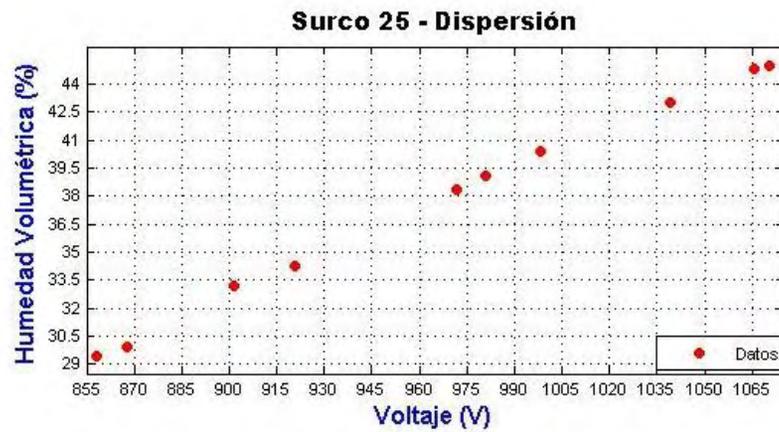
- Regresiones aplicadas a los datos experimentales obtenidos de la muestra de suelo tomada del Surco 2



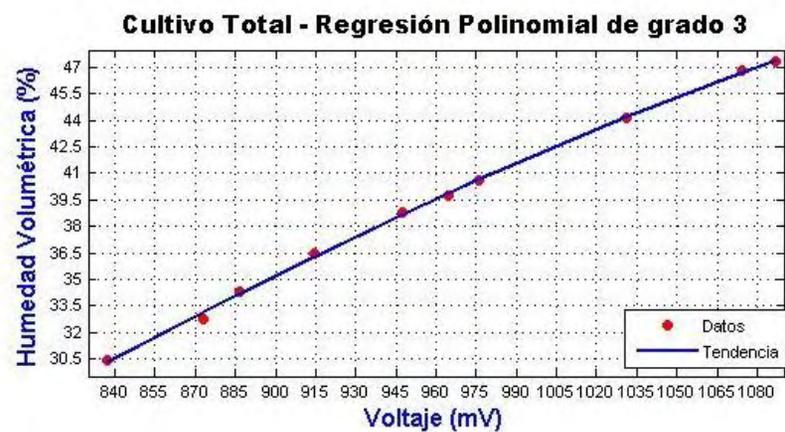
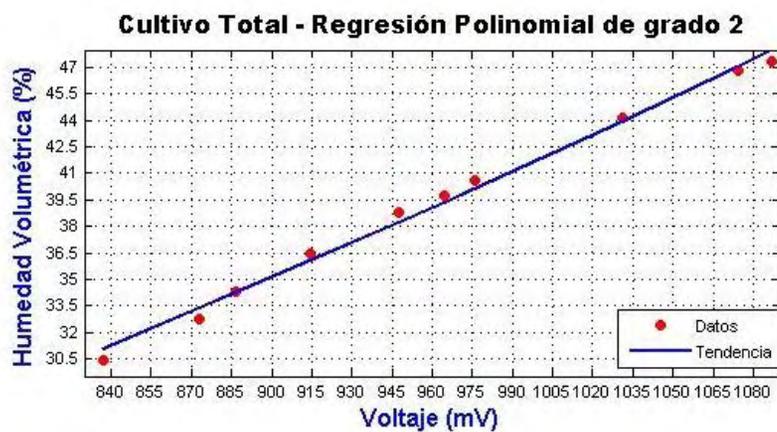
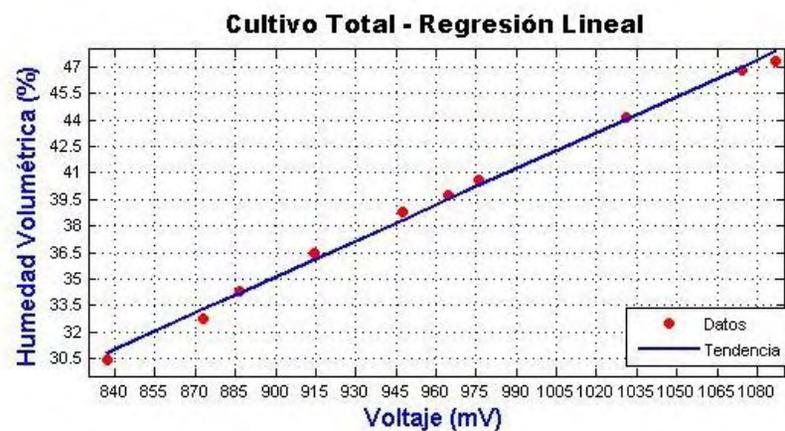
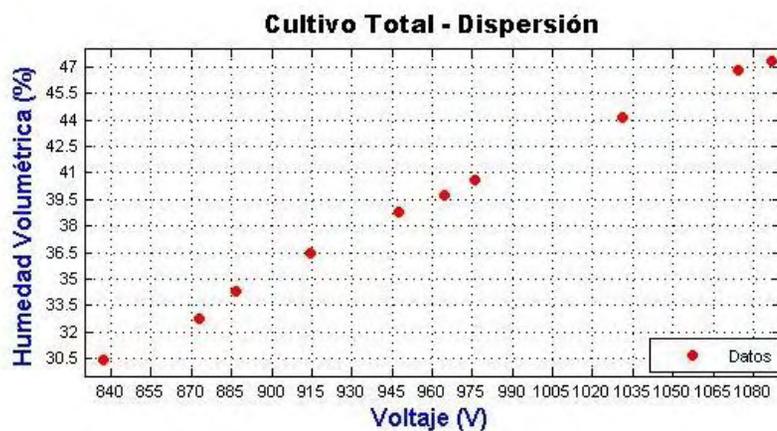
- Regresiones aplicadas a los datos experimentales obtenidos de la muestra de suelo tomada del Surco 13



- Regresiones aplicadas a los datos experimentales obtenidos de la muestra de suelo tomada del Surco 25



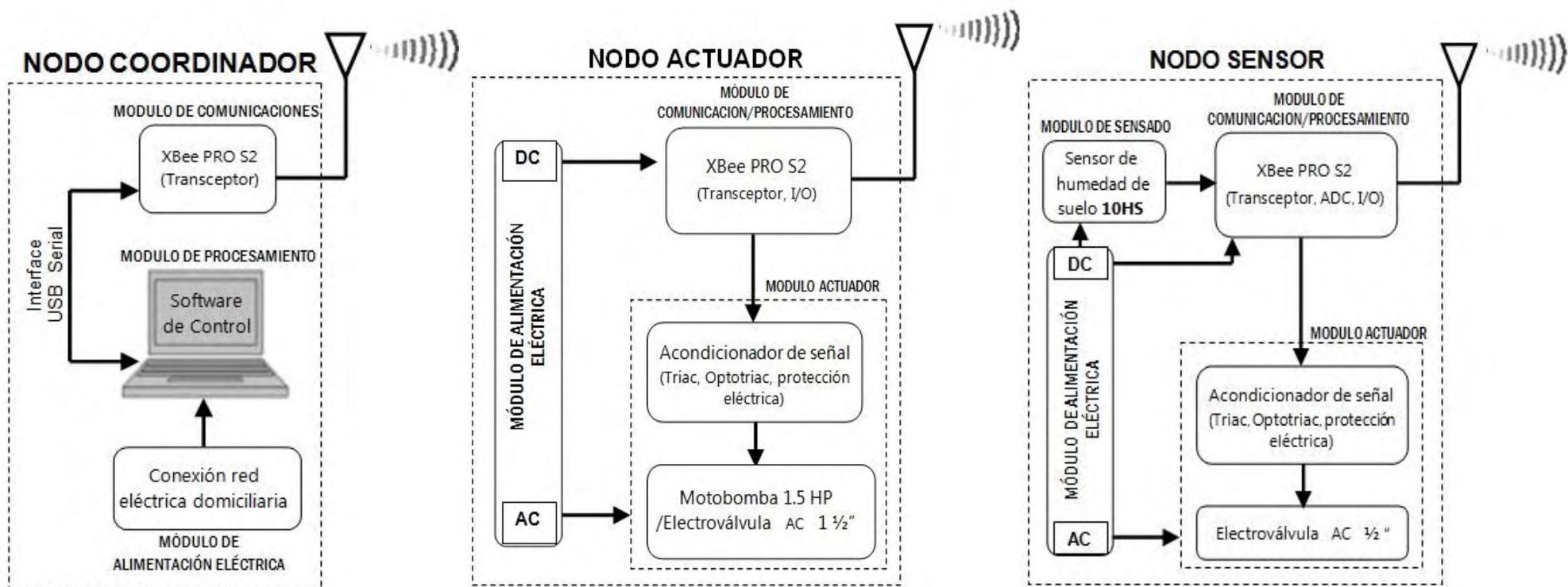
- Regresiones aplicadas a los datos experimentales obtenidos de la muestra de suelo tomada del Cultivo Total (15 Surcos)



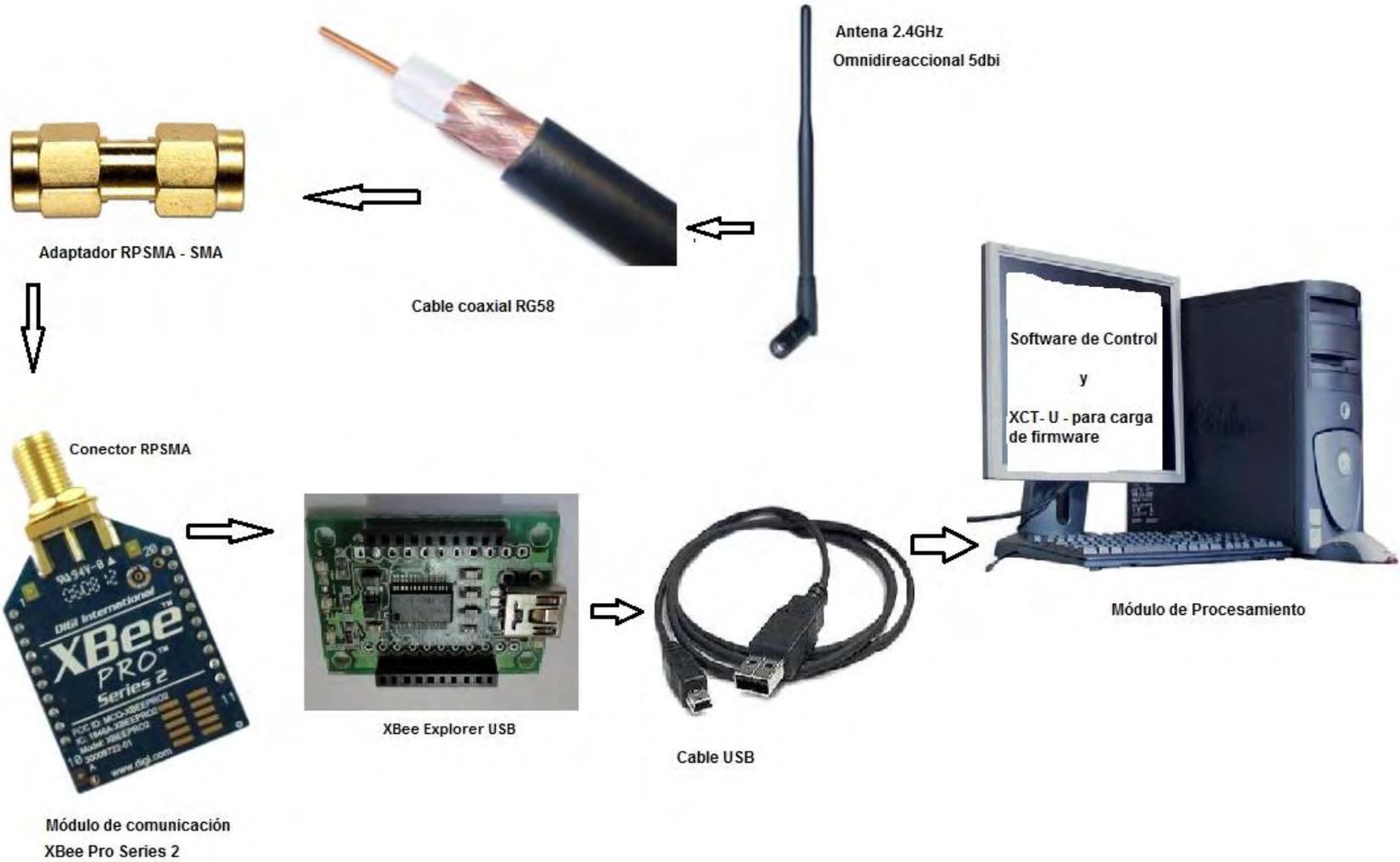
Anexo C. Distribución espacial de los nodos de red



Anexo D. Diagrama de bloques de los nodos de la WSN

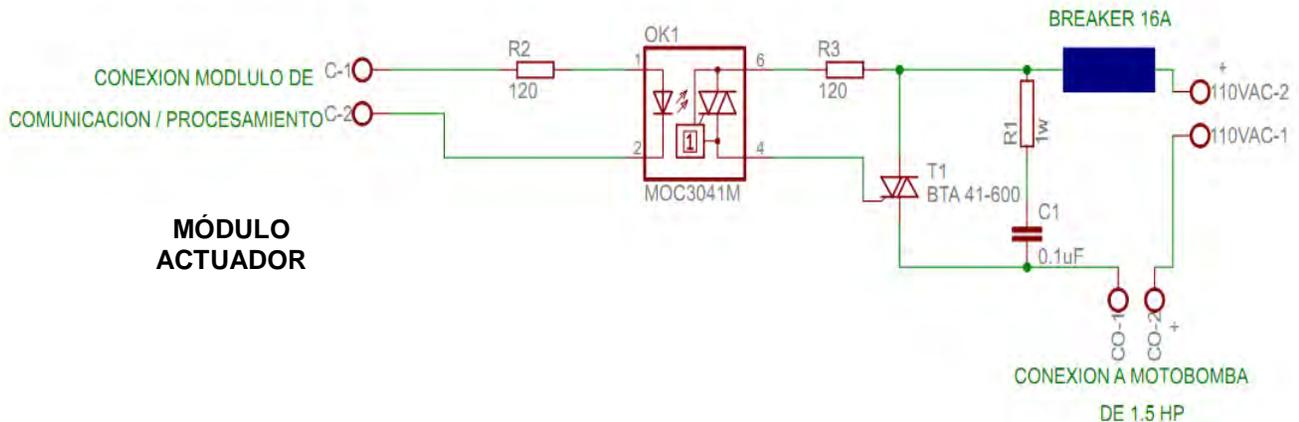
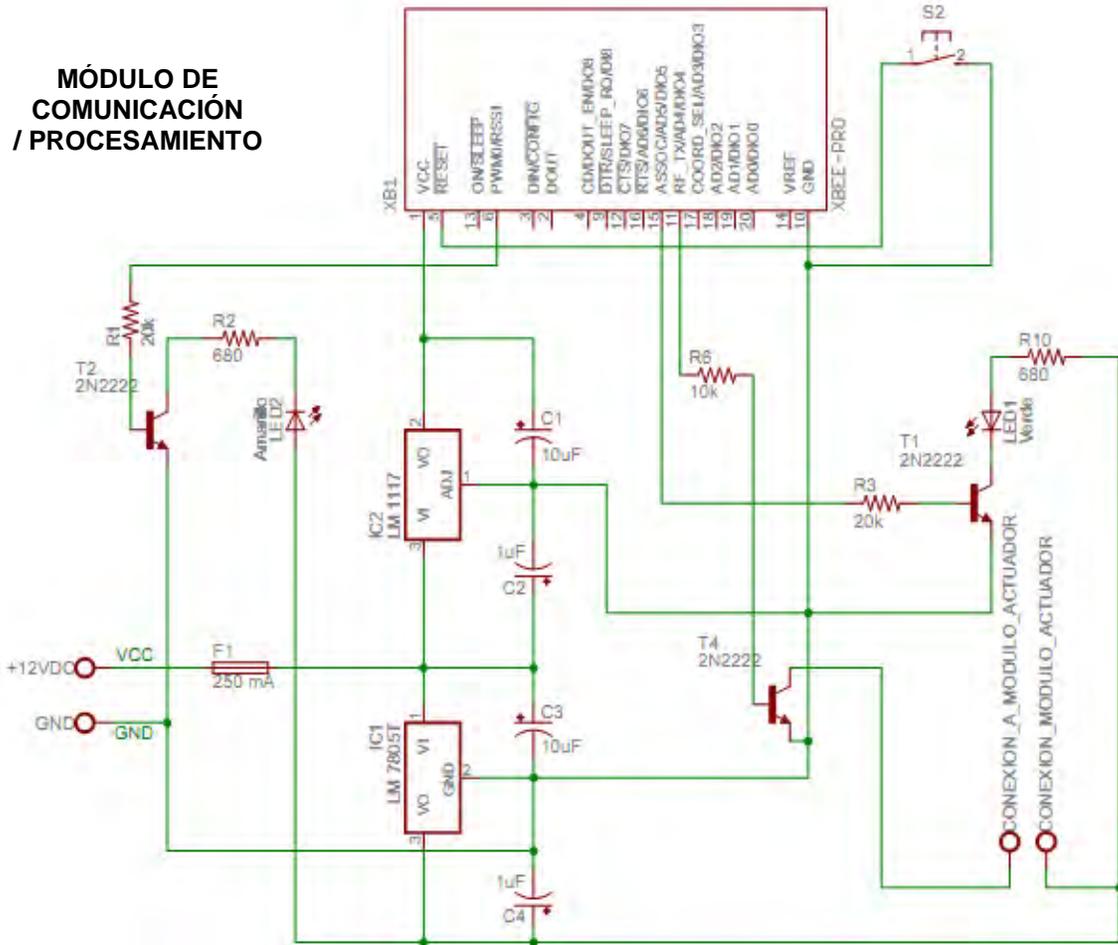


Anexo E. Módulos e interfaces del Nodo Coordinador



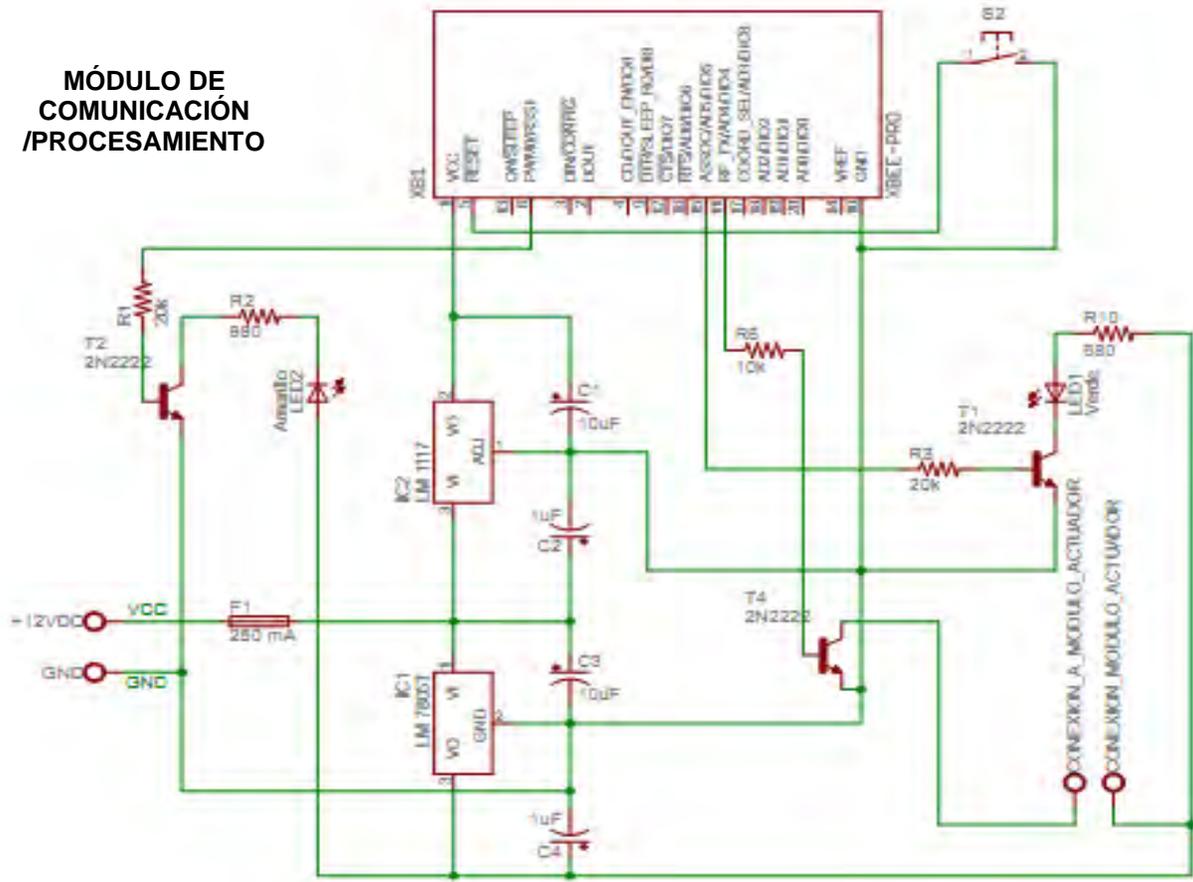
Anexo G. Esquema circuitual de Nodos actuadores

- **Nodo actuador - Motobomba**

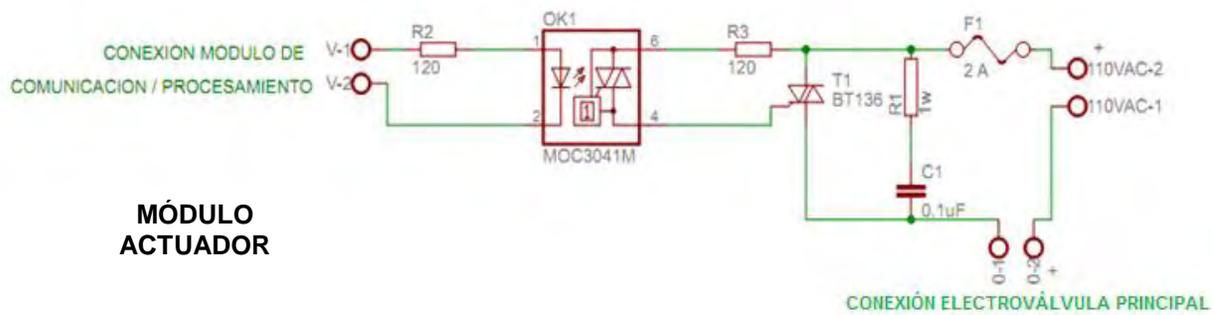


- **Nodo actuador – Electroválvula Principal**

MÓDULO DE COMUNICACIÓN / PROCESAMIENTO



MÓDULO ACTUADOR



Anexo H. Cálculo de Umbral de Riego y parámetros hídricos

Zonas de Manejo	Surcos Representativo	<i>CC</i> (%)	<i>PMP=0.55*CC</i> (%)	<i>AU=CC-PMP</i> (%)	<i>NAP</i> (%)	<i>HA=AU*NAP</i> (%)	<i>UR=CC-HA</i> (%)
Zona Alta	2	40.10	22.06	18.05			
Zona Media	13	39.75	21.86	17.89	15	9.02	31.08
Zona Baja	25	42.05	23.13	18.92	15	8.94	30.81
Cultivo Promedio	Todo Cultivo (15 surcos)	39.97	21.98	17.99	15	9.46	32.59

Donde:

CC: Capacidad de Campo

PMP: Punto de Marchitez permanente

AU: Agua útil

NAP: Nivel de agotamiento permisible

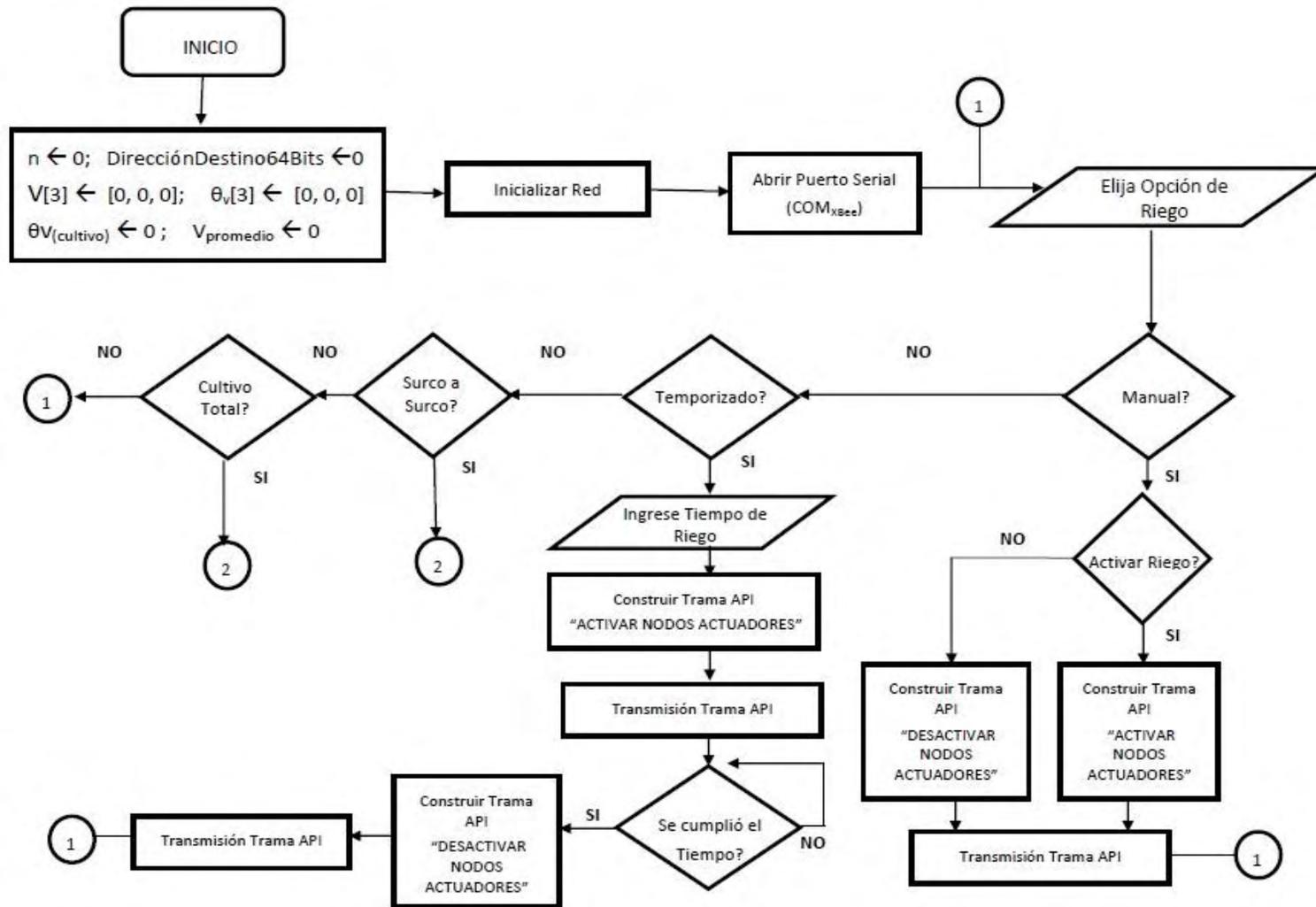
HA: Agua fácilmente aprovechable

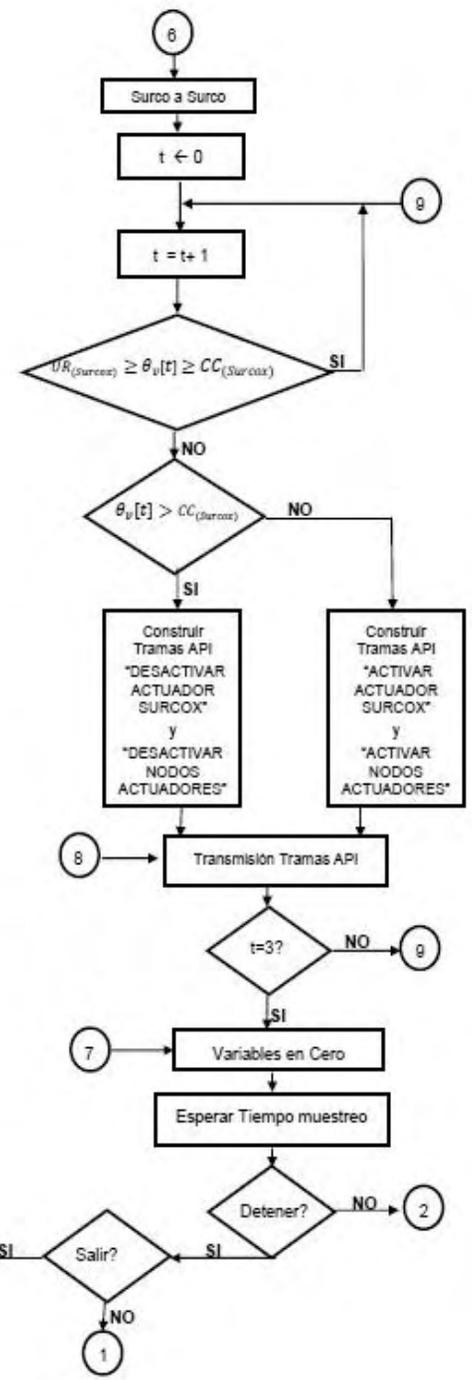
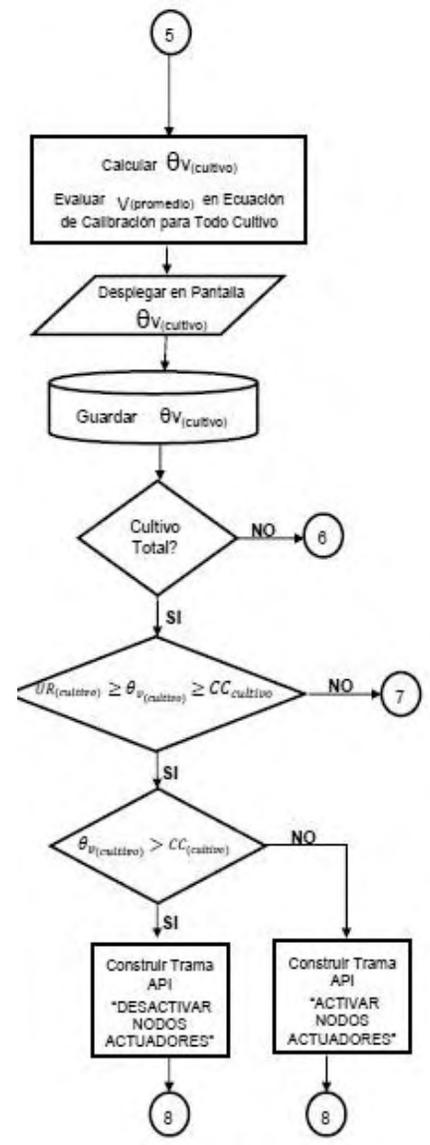
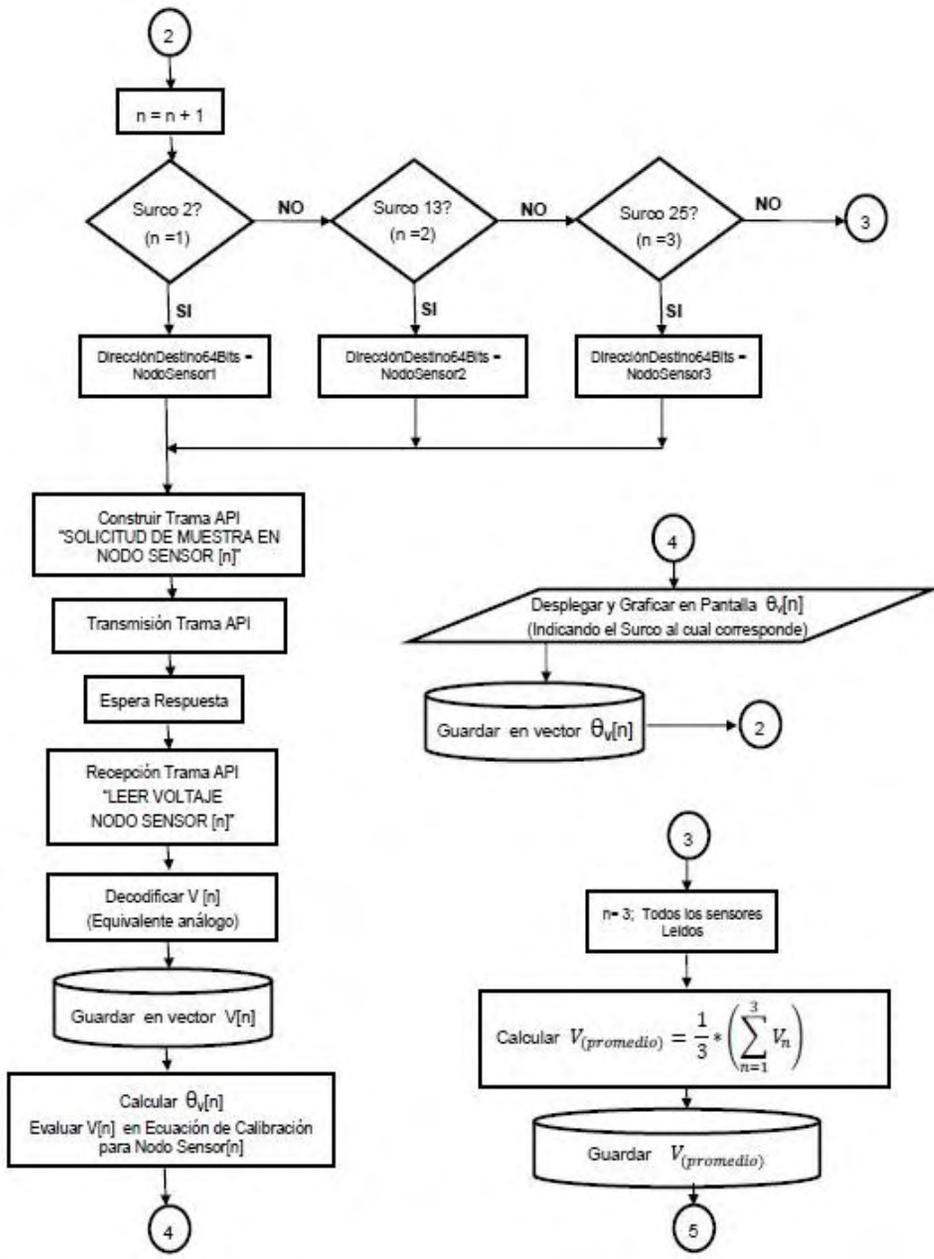
UR: Umbral de riego

Anexo I. API, paquetes y clases de Java usadas en el software de control

API	PAQUETE	CLASES USADAS	UTILIDAD
API de Java (incluido en JDK)	java.io	CommPortIdentifier, PortInUseException; SerialPort; SerialPortEvent; SerialPortEventListener; UnsupportedCommOperationException;	Manejar el flujo de datos (streams) de salida y entrada para leer y escribir datos en el módulo XBee a través del puerto serial.
	java.util	Arrays; Enumeration; Calendar; List; Date; TooManyListenersException;	Manipular, procesar y construir Tramas API como vectores ordenados para la transmisión y recepción de datos de configuración y control de los nodos de red.
	java.text	SimpleDateFormat	Definir el formato de presentación de la fecha y hora que indica el instante en que fue medida la humedad volumétrica de suelo
	java.awt	Color	Modificar el color de los objetos de la interfaz gráfica de usuario.
	javax.swing	Swingworker; JOptionPane; Icon; ImageIcon;	Construir los objetos de la interfaz gráfica de usuario y evitar que la interface gráfica se "congele" cada vez que se ejecuten los ciclos repetitivos del programa usando hilos independientes.
JFreeChart	org.jfree.chart	ChartFactory; ChartFrame; JFreeChart;	Desplegar una gráfica de series de tiempo que despliegue la variable medida y la hora en la que fue tomada
	org.jfree.data.time	Minute; Second; TimeSeries; TimeSeriesCollection;	Configura la gráfica de visualización de datos medidos
RXTXcomm.jar	gnu.io	CommPortIdentifier; SerialPort; SerialPortEvent; NoSuchPortException; PortInUseException; SerialPortEventListener;;	Configurar el puerto serial del computador para intercambiar datos con el módulo XBee del coordinador

Anexo J. Diagrama de Flujo de Software de Control





Anexo K. Presupuesto Detallado por Módulos

MÓDULOS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA			
LISTA CONCEPTOS	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	TOTAL
Tranceiver Xbee Pro Ref: XBP24-Z7CIT	123000	6	738000
Circuito impreso para conexión de módulos Xbee	20000	6	120000
Tarjeta UBS Para Xbee Ref: XBEE EXPLORER	43100	1	43100
TOTAL			901100

MÓDULOS DE SENSADO			
LISTA CONCEPTOS	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	TOTAL
Sensor de humedad en suelos Ref.: 10HS	453000	3	1359000
Conector estéreo hembra 3,5 mm.	1500	3	4500
TOTAL			1363500

MÓDULOS ACTUADORES			
LISTA CONCEPTOS	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	TOTAL
Válvula solenoide, uso general 2 vías Normalmente cerrada 110VAC, ½" NPT.	121000	3	363000
Válvula solenoide, uso general 2 vías Normalmente cerrada 110VAC, 1 ½" NPT.	516000	1	516000
Circuito impreso para control de disparo de válvulas solenoides.	15000	4	60000
Circuito impreso para control de disparo de motobomba	32000	1	32000
Control de mando de motobomba	366000	1	366000
TOTAL			1337000

ANEXO 4. MÓDULO DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA			
LISTA CONCEPTOS	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	TOTAL
Fuente 12VDC 4,2 AMP	70000	1	70000
Fuente 5VDC 1 AMP	45000	1	45000
TOTAL			115000

ELEMENTOS DE PROTECCION, CABLEADO Y CONEXIÓN.			
LISTA CONCEPTOS	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	TOTAL
Cableado energía AC	1350	120	162000
Cableado energía DC	1000	120	120000
Conduit para protección de cableado.	1650	85	140250
Cable usb	5000	1	5000
Caja de protección para intemperie, de los módulos xbee configurados como END DEVICE.	20000	4	80000
Caja contenedora módulo xbee configurado como COORDINADOR	15000	1	15000
Abrazaderas, uniones, etc. Para manguera de riego	80000	3	240000
TOTAL			762250

ELEMENTOS CIRCUITOS VARIOS			
LISTA CONCEPTOS	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	TOTAL
Condensadores, resistencias, transistores, diodos, leds, bases para circuitos integrados, bombillos pilotos, conectores sma, silicona loctite, etc.	NO APLICA	VARIOS	200000
TOTAL			200000

ANEXO 7. IMPREVISTOS			
LISTA CONCEPTOS	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	TOTAL
Módulo Xbee pro s2b con conector RP-SMA	130000	1	130000
Mototool para fabricación de circuitos impresos	50000	1	50000
Brocas de 0,7 0,6 0,5 mm.	2000	10	20000
Antena dipolo.	60000	1	60000
Tornillos, clavos, madera, tubos pvc, uniones para pvc, etc	40000	Varios	40000
TOTAL			300000

Anexo L. Análisis general del consumo eléctrico de todo el sistema

NODO DE LA WSN	NODO COORDINADOR	NODO SENSOR	NODO ACTUADOR ELECTROVÁLVULA	NODO ACTUADOR MOTOBOMBA
COMPONENTES PRINCIPALES	Computador Personal, XBee PRO Series2, Tarjeta XBee Explorer	XBee PRO Series2, sensor 10HS, electroválvula AC ½", circuito acondicionador de señal.	XBee PRO Series2, electroválvula 1 ½",	XBee PRO Series2, motobomba 1.5HP
POTENCIA (W)	200.68	9.18	56.71	1155.71
NÚMERO DE NODOS	1	3	1	1
POTENCIA TOTAL (W)	200.68	27.54	56.71	1155.71
Considerando la máxima potencia de los dispositivos, se estima aproximadamente la potencia total de todo el sistema como: 1.44 KW				

De acuerdo a los resultados consignados en la Tablas 24 y 25 de la fase de resultados se puede hacer un análisis general, del consumo de energía eléctrica mensual, considerando como tiempo de consumo diario los tiempos de riego resultantes, suponiendo el caso extremo en el que el sistema se activa todos los días

SURCO	Tiempo de Riego en minutos	Tiempo de Riego en horas (t)	Potencia máxima del sistema (P)	Consumo de energía eléctrica diario $E = P*t$	Consumo de energía eléctrica mensual $E_m = E*30$
2	10 min	0.17 h	1.44 KW	0.24 KWh	7.2 KWh
13	17 min	0.28 h	1.44 KW	0.40 KWh	12 KWh
25	19 min	0.32 h	1.44 KW	0.46 KWh	13.8 KWh
Cultivo Total	19 min	0.32 h	1.44 KW	0.46 KWh	13.8 KWh