

# Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de variables microclimáticas en el Relicto Vegetal Cedro Rosado

Wireless sensor network for monitoring variables weather in the Relicto Vegetal Cedro Rosado

Sócrates Nelson Muñoz Barragán, Andrés Felipe Toquica Álvarez, José Bestier Padilla Bejarano  
*Programa de Tecnología en Instrumentación Electrónica, Universidad del Quindío, Armenia, Quindío*  
Correo-e: jbpadilla@uniquindio.edu.co

**Resumen**— Este documento muestra la implementación de una red de sensores inalámbricos para la medición de variables microclimáticas en el Relicto Vegetal Cedro Rosado ubicado dentro de la Universidad del Quindío. La red cuenta con tres nodos sensores que permiten la adquisición de los datos correspondientes a las variables: Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Radiación Solar, Humedad del Suelo, Velocidad del Viento, Dirección del Viento y Precipitación. Los datos adquiridos son procesados y enviados a un Gateway mediante la utilización de una red inalámbrica con protocolo DigiMesh usando la banda libre de 900 MHz, los datos son recibidos por un Gateway que está conectado a un computador para su posterior procesamiento en una plataforma tecnológica.

**Palabras clave**— Red de sensores inalámbricos, DigiMesh, monitoreo de variables microclimáticas.

**Abstract**— This paper shows the implementation of a network of wireless sensors for the measurement of microclimatic variables in the Relicto Vegetal Cedro Rosado located within the University of Quindío. The network has three sensor nodes that allow the acquisition of data corresponding to the variables: temperature, relative humidity, atmospheric pressure, solar radiation, soil moisture, wind speed, wind direction and precipitation. The acquired data is processed and sent to a Gateway using a wireless network with DigiMesh protocol using the 900 MHz free band, the data is received by a Gateway that is connected to a computer for later processing in a technological platform.

**Key Word** — Wireless, Sensor network, DigiMesh, monitoring of Weather variables.

## I. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de redes inalámbricas han tenido un rápido desarrollo en los últimos años, se ha pasado del convencional infrarrojo para comunicaciones punto a punto a las redes

inalámbricas de área personal (Wireless Personal Area Network – WPAN) de corto alcance y multipuntos como “BlueTooth” o las redes de rango de alcance medio multisaltos como “ZigBee”. Otras tecnologías inalámbricas que podemos nombrar son, la tecnología WIFI que incluye los estándares 802.11 de las redes inalámbricas de área local (Wireless Local Area Network – WLAN), la tecnología WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) para redes inalámbricas de área metropolitana (Wireless Metropolitan Area Network – WMAN). También la telefonía celular de largo alcance (General Packet Radio Service - GPRS)[1].

Entre las tecnologías inalámbricas que más ha tendido avance en los últimos años se encuentran las redes de sensores inalámbricos formadas por nodos capaces de obtener información del medio, tratarla y enviarla inalámbricamente, formando una red de comunicación WPAN como se define en el estándar IEEE 802.15.4. Las redes de sensores inalámbricos (RIS) o (WSN) por sus siglas en inglés “Wireless Sensors Network” son una tecnología en crecimiento con un gran futuro que pueden ser usadas en diferentes sectores [2]. De hecho, los principales fabricantes tecnológicos, dentro de las tecnologías inalámbricas, valoran las redes inalámbricas de sensores como una de las opciones de futuro más prometedora [1], [3], [4].

Las RSI se basan en dispositivos de bajo costo y consumo llamados nodos, capaces de obtener información de su entorno, procesarla localmente, y comunicarla a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central de coordinación. Los nodos actúan como elementos de la infraestructura de comunicaciones al reenviar los mensajes transmitidos por nodos más lejanos hacia al centro de coordinación. La red de sensores inalámbricos está formada por numerosos dispositivos distribuidos espacialmente, que utilizan sensores para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre

ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y movimiento o los contaminantes. Los sensores pueden ser fijos o móviles. Los dispositivos son unidades autónomas que constan de un microcontrolador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un radio transceptor y un elemento sensor [1], [3].

Por otra parte, los avances tecnológicos en instrumentación y las comunicaciones inalámbricas han desempeñado un papel muy importante en el desarrollo de la humanidad, así mismo las tecnologías inalámbricas han venido siendo utilizadas en diferentes áreas como en el monitoreo de ambientes hostiles donde se desea la mínima alteración e interacción de personas o factores externos, de hecho las RSI son una tecnología apropiada para realizar medición de variables microclimáticas en lugares de difícil acceso o donde se requiera la mínima interacción humana posible, permitiendo un monitoreo económico, continuo y en tiempo real.

Colombia pertenece al exclusivo club de los países de la mega diversidad. Cerca de doce países han sido singularizados por este tipo de riqueza, es decir, por su alta variedad de especies animales y vegetales, ecosistemas, y genética. Sin embargo, una de las mayores tragedias contemporáneas en materia ambiental es el pasmoso proceso de declive de la biodiversidad, como consecuencia de la acción humana [5]. El departamento del Quindío no se escapa a esta realidad, siendo uno de los más pequeños de Colombia es uno de los más ricos en biodiversidad, esto gracias a sus condiciones geográficas, sin embargo, se han talado los bosques de la región para destinar las tierras al sector agrícola y asentamientos humanos; quedando reducida la vegetación a pequeñas reservas las cuales son preservadas por diferentes organizaciones y entidades.

Atendiendo estas consideraciones la Universidad del Quindío tiene bajo su responsabilidad velar por cuatro reservas naturales de la región con el fin de garantizar su protección, conservación y restauración de la biodiversidad presente en cada área, entre éstas reservas naturales se encuentra: la Montaña del Ocaso ubicada en el municipio de Quimbaya, El Relicto Vegetal Granja Bengala situado vía hacia el municipio de Filandia, la Reserva Natural La Sonadora ubicada entre los municipios de Calarcá y Córdoba, finalmente está el Relicto Vegetal Cedro Rosado Ubicado en el campus de la Universidad del Quindío, en Armenia.

Para ejercer un control continuo sobre las diferentes variables de éstas reservas es necesario hacer un monitoreo de condiciones como temperatura, humedad relativa, radiación solar, precipitación y viento (dirección y velocidad), este proceso se dificulta porque se requiere personas que se desplacen desde un área a otra para realizar mediciones, lo que conlleva a un consumo de tiempo y recursos económicos.

Es así que en búsqueda de soluciones y como proyecto inicial se requiere diseñar e implementar un sistema de medición

para las variables microclimáticas que interactúan en el Relicto Vegetal Cedro Rosado, almacenar la información, trasmitirla para su posterior procesamiento, análisis, de una manera práctica, segura y económica. Debe señalarse que al tener información microclimática recolectada esta puede ser utilizada para el análisis de variables de tipo biológico y para soportar la importancia de los relictos boscosos como alternativa para minimizar los efectos del cambio climático.

El presente trabajo muestra el diseño e implementación de una *red de sensores inalámbricos para la medición de variables microclimáticas en el relicto vegetal cedro rosado* de la Universidad del Quindío cuyo principal propósito fue obtener medidas de las variables climáticas, de manera automática, sin la necesidad de la intervención humana y en cualquier momento.

## II. METODOLOGÍA

### A. Definición de puntos de medición

Se realizó el análisis del área de aplicación donde se requiere hacer la medición de las variables microclimáticas, correspondiente a un fragmento de 13.5 hectáreas de vegetación natural intervenida con manchas de bosque secundario y guaduales. En la Fig. 1 se observa una panorámica área del Relicto Vegetal.



Fig. 1. Panorámica aérea Relicto Vegetal Cedro Rosado.

Para el área de aplicación se ha dispuesto de tres sitios donde están ubicados los nodos para la medición distribuidos en: Interno en el Relicto, en el borde al Relicto y afuera de este. En la Fig. 2 se ilustra la distribución de los nodos sensores.

### B. Escogencia de las variables a medir y sus parámetros

Se definieron los parámetros técnicos para la implementación de los nodos sensores y la red inalámbrica. Para el proyecto se utilizó hardware de la empresa Libelium: Waspote v2.0 (Fig. 3), Agriculture Sensor Board v2.0 (Fig. 4) y módulos XBEE PRO 900HP [6].



Figura 2. Ubicación de los nodos sensores en el Relicto Vegetal Cedro Rosado.

Wasp mote es el hardware que permite la construcción de los nodos sensores de la red de sensores inalámbricos, esta se encarga de realizar las medidas de los diferentes sensores a través de la placa de Agriculture que soporta los sensores utilizados, de igual manera la Wasp mote soporta el módulo de comunicación XBee PRO 900HP para comunicación inalámbrica. En la Fig. 3 se presenta las características y componentes generales de una Wasp mote y en la Fig. 4 la placa para sensores de agricultura.

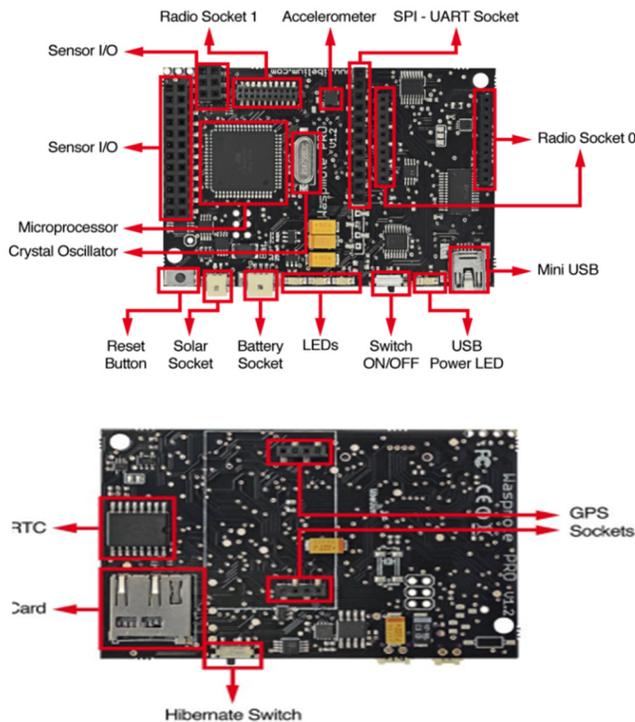


Fig. 3. Componentes generales de una Wasp mote [7].

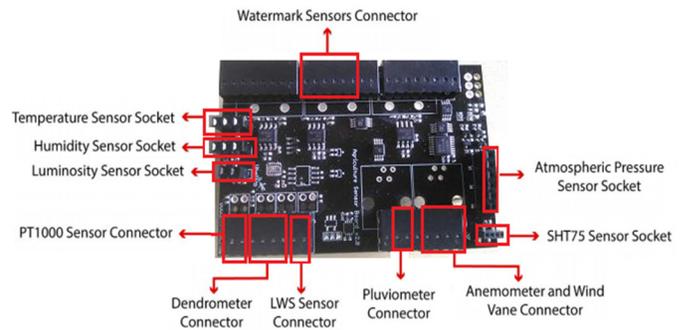


Fig. 4. Características generales Agriculture Sensor Board [7].

Se realizó la escogencia de los sensores requeridos según la necesidad y variables establecidas en el proyecto, en la tabla I se ilustra su aspecto físico y se describen las características generales.

TABLA I  
SENSORES EMPLEADOS EN EL PROYECTO

| Variable   | Características   |
|--|---|
| <p><b>Presión Atmosférica</b></p>  <p>Reference pin<br/>Sensor de Presión Atmosférica<br/>MPX4115A [8]</p>                                      | <p><b>Rango de medida:</b> 15 ~ 115kPa<br/> <b>Señal de salida:</b> 0.2 ~ 4.8V (0 ~ 85°C)<br/> <b>Sensibilidad:</b> 46mV/kPa<br/> <b>Exactitud:</b> &lt;math&gt;\pm 1.5\%&lt;/math&gt; V (0 ~ 85°C)<br/> <b>Consumo típico:</b> 7mA<br/> <b>Voltaje de alimentación:</b> 4.85 ~ 5.35V<br/> <b>Temperatura de operación:</b> -40 ~ +125°C<br/> <b>Tiempo de respuesta:</b> 20ms</p>  |
| <p><b>Temperatura y humedad relativa</b></p>  <p>Pin 1<br/>Pin 2<br/>Pin 3<br/>Pin 4<br/>Sensor de Temperatura y Humedad Relativa SHT75[9]</p> | <p><b>Consumo (medida):</b> 3mW<br/> <b>Consumo promedio:</b> 90μW<br/> <b>Temperatura de almacenamiento:</b> 10 ~ 50°C (0 ~ 80°C máximo)<br/> <b>Humedad:</b> 20 ~ 60%RH<br/> <b>Temperatura:</b><br/> <b>Rango de medida:</b> -40°C ~ +123.8°C<br/> <b>Resolución:</b> 0.04°C (mínimo), 0.01°C (típico)<br/> <b>Exactitud:</b> ±0.4°C (rango 0°C ~ +70°C), ±4°C (rango -40 ~ +125°C). <b>Repetitividad:</b> ±0.1°C<br/> <b>Humedad:</b><br/> <b>Rango de medida:</b> 0 ~ 100%RH<br/> <b>Resolución:</b> 0.4%RH (mínimo), 0.05%RH (típico)<br/> <b>Exactitud:</b> ±1.8%RH.<br/> <b>Repetitividad:</b> ±0.1%RH<br/> <b>Voltaje de alimentación:</b> 2.4 ~ 5.5V<br/> <b>Consumo mínimo (modo sleep):</b> 2μW</p> |

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Humedad del Suelo</b></p>  <p><i>Sensor de humedad del suelo 200SS</i><br/>[10]</p> | <p><b>Rango de medida:</b> 0 ~ 200cb<br/> <b>Rango de frecuencia:</b> 50 ~ 10000Hz aproximadamente<br/> <b>Diámetro:</b> 22mm<br/> <b>Longitud:</b> 76mm<br/> <b>Calibre:</b> AWG 20</p>   |
| <p><b>Radiación solar</b></p>  <p><i>Sensor de Radiación Solar SQ-110</i> [11]</p>        | <p><b>Sensibilidad:</b> 0.200mV / <math>\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}</math><br/> <b>Factor de Calibración:</b> <math>5\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}/\text{mV}</math><br/> <b>Rango espectral:</b> 410 ~ 655nm<br/> <b>Exactitud:</b> <math>\pm 5\%</math> <b>Repetitividad:</b> <math>&lt; 1\%</math><br/> <b>Diámetro:</b> 2.4cm. <b>Altura:</b> 2.8cm<br/> <b>Temperatura de operación:</b> -40 ~ 70°C<br/> <b>Humedad de operación:</b> 0 ~ 100%RH</p> |
| <p><b>Velocidad del viento</b></p>  <p><i>Estación meteorológica WS-3000</i> [12]</p>    | <p><b>Sensibilidad:</b> 2.4km/h / turn<br/> <b>Rango velocidad del viento:</b> 0 ~ 240km/h<br/> <b>Alto:</b> 7.1 cm.<br/> <b>Largo del brazo:</b> 8.9 cm<br/> <b>Conector:</b> RJ11</p>  |
| <p><b>Dirección del viento</b></p>  <p><i>Estación meteorológica WS-3000</i> [12]</p>   | <p><b>Altura:</b> 8.9 cm<br/> <b>Largo:</b> 17.8 cm<br/> <b>Exactitud máxima:</b> 22.5°<br/> <b>Rango de la resistencia:</b> 688Ω ~ 120kΩ</p>  |
| <p><b>Pluviosidad</b></p>  <p><i>Estación meteorológica WS-3000</i> [12]</p>            | <p><b>Altura:</b> 9.05 cm<br/> <b>Largo:</b> 23 cm<br/> <b>Capacidad de captura</b> 0.28 mm de lluvia</p>  |

Con estos dispositivos se formaron los 3 nodos sensores encargados de realizar la medición de las variables microclimáticas. Los nodos se distribuyeron de la siguiente manera:

Nodo Sensor 1. Es el encargado del medir las variables microclimáticas al interior de relicto, mide temperatura, presión atmosférica, humedad relativa y humedad de la tierra a 30 cm de profundidad y a 60 cm de profundidad.

Nodo Sensor 2. Es el encargado de medir las variables microclimáticas en el borde del relicto, mide temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, humedad de la tierra a 30 cm de profundidad y radiación solar.

Nodo Sensor 3. Es el encargado de medir las variables afuera del relicto vegetal, mide temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, precipitación, dirección y velocidad de viento.

Cabe indicar que en un sistema de instrumentación es importante conocer las características de funcionamiento de los dispositivos con el fin de determinar si cumplen con las especificaciones técnicas para una aplicación específica, en la Tabla II se muestran los rangos de medición de los sensores utilizados para las variables vs las mediciones climáticas máximas y mínimas registradas en la región.

Comparando los rangos de datos en las mediciones hechas por los sensores junto a los rangos de datos históricos del clima en la región observados en diferentes sitios web como: IDEAM, Accuweather y la corporación autónoma regional del Quindío, se puede determinar que los rangos de medición de los sensores son adecuados haciendo posible su utilización en esta zona para las diferentes mediciones.

TABLA II  
RANGO DE LAS VARIABLES

| Rango de Medición de las Variables |  | Mediciones Max-Min             |
|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Presión atmosférica                | 15 ~ 115kPa  | 84 – 89 kPa                    |
| Temperatura                        | -40°C ~ +123.8°C   | 13 – 35 °C                     |
| Humedad Relativa                   | 0 ~ 100%RH   | 30 – 100 %RH                   |
| Humedad del Suelo                  | 50 ~ 10000Hz (0 ~ 200cb)                                       |                                |
| Radiación Solar                    | (0 – 4000) $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ | 4,0 – 4,5 KWh/m <sup>2</sup>   |
| Velocidad del viento               | 0 ~ 240km/h  | 0 – 61 km/h                    |
| Dirección del viento               | N, S, O, E   | NO – SO                        |
| Pluviosidad                        | 0.28 mm  | Record de lluvia 8.9 mm (1999) |

Una vez definido la instrumentación de los nodos sensores se procedió a realizar su respectiva programación y las rutinas de funcionamiento, se definió un periodo de sensado de 15 minutos, tiempo en el que se hace el almacenamiento de los datos tomados y se envían a través de la red inalámbrica,

luego de esta rutina los nodos sensores entran en modo durmiente por 15 minutos para ahorrar batería. Estos son alimentados por baterías recargables la cual se hace por medio de energía solar, cabe destacar que la Waspnote ya viene con esta funcionalidad.

### C. Diseño de la red

El siguiente paso fue la implementación de la red inalámbrica para la transmisión de los datos medidos. Esta se realizó por medio de una red en topología Mesh con los módulos XBee Pro 900HP que permiten esta funcionalidad, la red se implementa usando la banda de 900 MHz. Una de las capacidades de este tipo de red es que cualquier otro nodo sirve para retransmitir la información de los demás nodos, y así lograr que la información llegue hasta el destino final, en el caso de que un nodo no tenga conexión y se pierda (debido a pérdida de energía, obstrucciones ambientales, etc.) los datos críticos pueden llegar a su destino, usando cualquier otro nodo dentro de la red, debido a las capacidades de la red Mesh.

En la Fig. 5 se observa una panorámica de la red en topología Mesh implementada. Una red Mesh facilita ingresar un nuevo nodo a la red sin necesidad de hacer que este nodo tenga conexión directa con el destino final, esto garantiza que los paquetes de datos o “Frames” no se pierdan, de igual forma haciendo que no se necesite hacer cálculos extensos para realizar la adición de un nuevo nodo.

A continuación se describen los elementos que conforman la red:

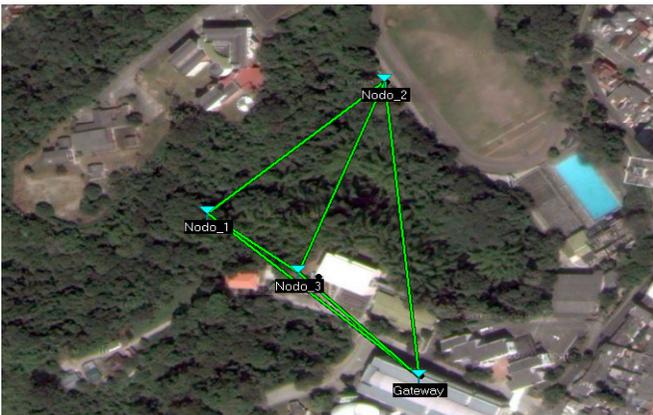


Fig. 5. Panorámica de la red Mesh implementada.

#### 1) Módulos de Trasmisión XBee PRO 900HP [6]

Para el proyecto se utilizaron módulos de trasmisión XBee PRO 900HP los cuales permiten la fácil implementación redes tipo Mesh, a través del protocolo DigiMesh. Son fabricados por la compañía “Digi International” quien es dueña del protocolo comercial DigiMesh. En la Fig. 6 se tiene una visual del módulo de comunicación utilizado XBee PRO S3B.



Fig. 6. Módulo de comunicaciones XBee PRO S3B.

#### 2) Gateway

Es el nodo destino de la red Mesh implementada y es el encargado de realizar la conexión entre la red inalámbrica y un PC. Este dispositivo recibe toda la información de los nodos de la red permitiendo el acceso a esta a través de diferentes aplicaciones con las que se puede visualizar y procesar de los datos. En la Fig. 7 se visualiza el hardware implementado para el Gateway



Fig. 7. Gateway.

#### 3) Nodos

Son los dispositivos de la red encargados de realizar la toma de los datos en los sitios de medición, están conformados por un sistema de adquisición de datos y un sistema de procesamiento y envío. En la Fig. 8 se ilustra el esquema de la conformación de la red

Los nodos implementados se componen de hardware Waspnote, sensores, baterías recargables, paneles solares y módulos de trasmisión XBee PRO 900HP. Debido a la geografía del Relicto se opta por usar la frecuencia libre de 900 MHz para la trasmisión de los datos recolectados, esta al ser de frecuencia baja es más penetrante, tiene mayor alcance y cobertura, se desempeña mejor en la vegetación por lo cual se hace apropiada para la trasmisión y uso de este tipo de datos. Las variables que medirán los nodos fueron distribuidas

de acuerdo a las sugerencias del Biólogo acompañante en el proyecto.

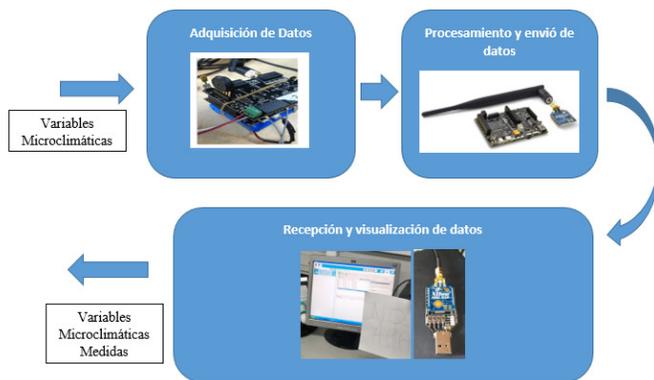


Fig. 8. Conformación de la red.

Las variables que miden los nodos fueron distribuidas de acuerdo a las sugerencias de uno de los asesores dentro del proyecto el profesional en biología quien a través de su acompañamiento sugiere el tipo de variable a medir en cada uno de los nodos. En la Fig. 9 se muestra la red de sensores inalámbrica implementada, los nodos y las variables que se tuvieron en cuenta para la red.

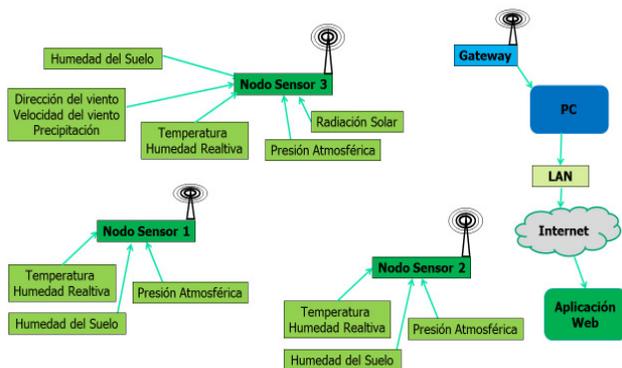


Fig. 9. Red de sensores inalámbricos implementada.

Cabe resaltar que el protocolo DigiMesh permite velocidades de transmisión de 10 Kbps hasta 200 Kbps, cobertura desde 4 Km a 14 Km y carga de datos hasta 73 Bytes, con lo cual es suficiente para la transmisión de los datos adquiridos.

DigiMesh presenta las siguientes características:

- Todos los nodos pueden reenviar mensajes (Mesh)
- Diseñado para aplicaciones de bajo costo, bajo consumo de energía.
- Un solo tipo de nodo.
- No existen relaciones padre-hijo.
- Descubrimiento automático de rutas.
- Red se auto corrige.
- Todos los nodos pueden dormir

En la Fig. 10 se observa esquemáticamente la conexión entre módulos DigiMesh en topología Mesh (Protocolo DigiMesh).

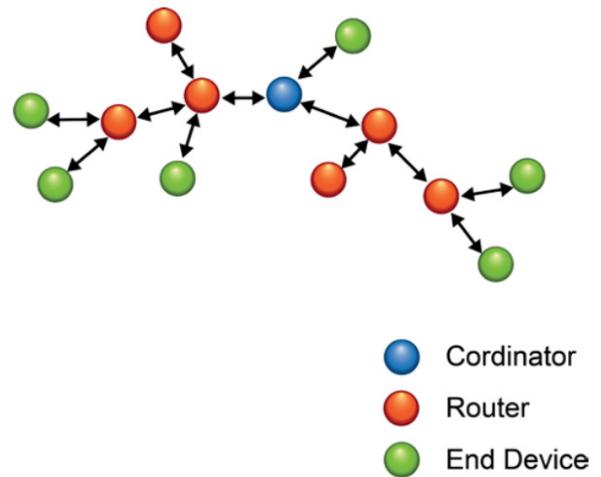


Fig. 10. Protocolo DigiMesh.[13]

Los módulos XBee se han escogido para el proyecto porque sus características se adaptan a las necesidades requeridas para la transmisión, con estos se tiene una red de sensores inalámbricos de bajo consumo energético, capaz de entrar en modo Sleep, con capacidad de transmisión de datos a través de los nodos que la conforman, esto es útil ya que por medio de los nodos intermedios se logra comunicación desde el nodo más lejano al Gateway.

Las variables medidas son:

- Temperatura ambiente
- Presión atmosférica
- Radiación solar
- Dirección del viento
- Humedad relativa
- Humedad del suelo
- Velocidad del viento
- Pluviosidad

Una vez se conectó la red se procedió a la codificación de los datos para el envío, configurando la trama con la siguiente información:

- Identificación del nodo
- Fecha (año, mes, día, hora, minuto, segundo)
- Información interna del nodo (nivel de batería, temperatura)
- Información GPS (latitud, longitud, altura)
- Variables medidas

Estas especificaciones se tienen en cuenta para el diseño del paquete (payload) que contiene las mediciones de los diferentes sensores. Todos los nodos envían un paquete de información “frame” con el mismo tamaño “length”, de la siguiente forma:

```
uint8_t framebuffer [56] = {};
```

El tipo de dato enviado en cada posición del vector “frame” es un entero sin signo de 8 bits y la longitud del vector es de 56 bytes.

Los datos transmitidos por la red inalámbrica son datos de tipo binario usando comunicación digital, se aprovecha esto para enviar datos de tipo hexadecimal, la información almacenada por los sensores se hace en variables de tipo flotante, para transmitir estos datos en su nivel más puro se descompone el flotante en 4 bytes de tipo hexadecimal, cuando el dato que se transmite es de tipo entero se utiliza solamente un byte de tipo hexadecimal, así se codifica la trama asignando posiciones donde deben estar ubicados siempre los mismos datos.

De acuerdo a la codificación de la información que se tiene por medio de las instrucciones implementadas se logra tener una trama en hexadecimal de 68 bytes, esta es enviada a través de la red y contiene toda la información del nodo.

#### 4) Visualización de los datos

Para ver las variables adquiridas, Waspnote cuenta con librerías e instrucciones que permiten esta visualización por medio de una terminal o consola a través de su software de desarrollo de manera sencilla.

#### D. Implementación de la red

Luego de haber pasado por los estudios técnicos y de haber definido el diseño como tal de la instrumentación, procesamiento y radio enlace, se procede a implementar el diseño previamente concebido, para ello es preciso hablar de la programación de los sistemas (nodos) dentro del proyecto se manejan tres sistemas que contienen características semejantes, porque todos utilizan el mismo tipo de tecnología en sus componentes esto es de suma ayuda a la hora de implementar ya que lo que se haga en un sistema (nodo) se verá reflejado en los demás.

#### Descripción y configuración del Gateway.

Para que la red funcione de acuerdo a las especificaciones del diseño se configuran los módulos XBee S3B. Estos módulos poseen infinidad de configuraciones. Se usa un dispositivo hardware conectado al puerto USB del PC llamado Gateway, para hacer la respectiva configuración y se establece comunicación entre el PC y el módulo XBee sirviendo este de conector.

X-CTU es una aplicación multi-plataforma gratuita que permite a los desarrolladores administrar los módulos de radio frecuencia (RF) de DIGI a través de una interfaz gráfica sencilla de usar. La aplicación incluye herramientas integradas que facilitan la configuración, y prueba de los módulos [14].

Una vez montado el XBee S3B en el Gateway, se configura el canal “asignación de frecuencia”, el PAN ID “identificación de una red de área personal”, modo de API. En esta configuración se incluye el cambio de firmware de los módulos XBee para un nuevo Firmware que se ajusta a las necesidades de una red Mesh, entre otras.

#### Implementación de los nodos en campo

Para implementar los nodos en campo se hace la correspondiente programación, de acuerdo al estudio previo del diseño de trama.

Necesidades para la programación:

- Tiempo de entrega de datos al Gateway: 1 hora.
- Uso adecuado de la energía.

Mediante la plataforma de programación que ofrece Libelium, se llevó a cabo la programación de los nodos sensores y haciendo uso de las librerías Open Source que proporciona Libelium para este tipo de programación. Una vez hecha la programación y haber configurado los módulos XBee para que trabajen en la red usando topología Mesh queda listo el diseño para ser puesto en funcionamiento desplazando cada uno de los sistemas al punto donde estarán ubicados permanentemente.

Ahora se procede a implementar la red en campo, se requiere tener un sistema de alimentación para los nodos sensores. Waspnote viene equipada para trabajar con baterías recargables por medio de paneles Solares, se requiere que el gasto energético del nodo sea compensado con la luz del día por medio del panel solar para que la batería no se descargue. Para esto se utilizó una batería de 4,7 V a 6600mA/h y un panel solar de 7,4V y 0,5A. Para darle robustez mecánica a los nodos y poder instalarlos se utilizan cajas plásticas para exteriores que cumplen con el grado de protección IP65.

En la Fig. 11 se ilustra los nodos instalados en campo.



Fig. 11. Nodos 1, 2 y 3 en campo.

### III. RESULTADOS

Utilizando la herramienta X-CTU se adecuaron y acondicionaron los parámetros iniciales de conectividad de los XBee Pro S3B, con la opción RANGE TEST del software X-CTU se logró validar la información sobre los niveles de potencia que existen entre los diferentes nodos logrando con esto asegurar el destino final de la información.

#### Potencia Nodo 1 – Gateway.

El resultado de esta prueba indica el nivel (RSSI) indicador de fuerza de la señal recibida, se puede observar que el tiempo que dura encendido el módulo es muy corto cercano a 1 minuto y 15 segundos, tiempo en el cual se logra hacer la prueba (Fig. 12), esto se debe a que por especificaciones de diseño este módulo de transmisión se activa, espera para que sirva de puente a nodo 2 si lo necesita y luego envía su propia información, para luego apagarse nuevamente.

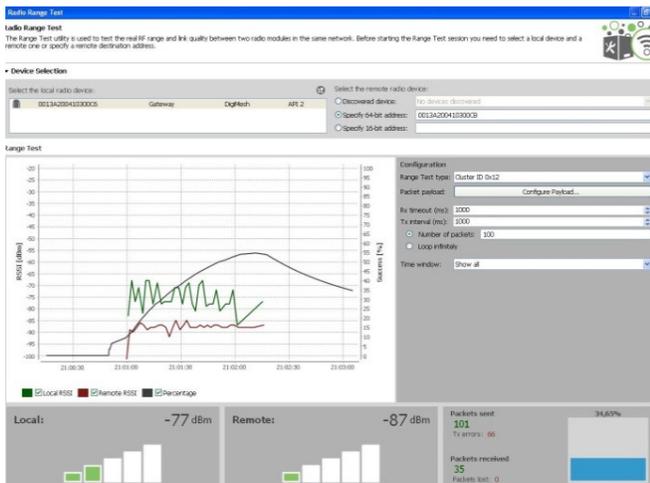


Fig. 12. Potencia Nodo 1 – Gateway.

#### Potencia Nodo 2 – Gateway.

El resultado de esta prueba indica el nivel (RSSI) indicador de fuerza de la señal recibida, se puede observar que el tiempo que dura encendido el módulo es muy corto, cercano a 30 segundos, tiempo en el cual se logra hacer la prueba (Fig. 13), este tiempo se debe a especificaciones en el diseño ya que los nodos duermen 1 hora y se despiertan solo para hacer el envío de la información, el tiempo de nodo 2 es el más corto ya que es el primero que realiza la transmisión y no sirve de puente para la transmisión de datos a los demás nodos, por esto después de transmitir se apaga.

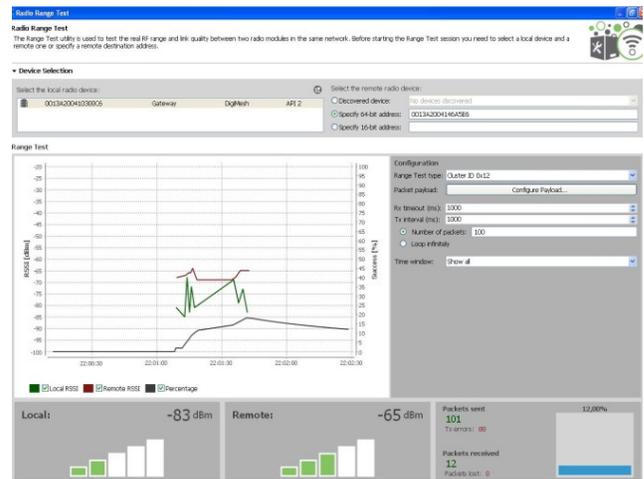


Fig. 13. Potencia Nodo 2 – Gateway.

#### Potencia Nodo 3 – Gateway.

El resultado de esta prueba indica el nivel (RSSI) indicador de fuerza de la señal recibida, se puede observar que el tiempo que dura encendido el módulo es más largo en comparación a los nodos 1 y 2, cercano a los 2 minutos y 10 segundos, tiempo en el cual se logra hacer la prueba (Fig. 14), esto se debe a que este módulo de transmisión se enciende y permanece encendido sirviendo de puente para los nodos 1 y 2 si lo necesitase, después de esto es el último que envía su propia información y regresa a su estado apagado.

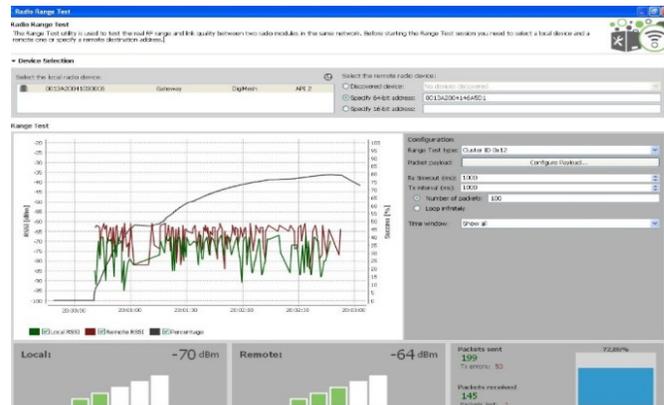


Fig. 14. Potencia Nodo 3 – Gateway.

#### Resultados de la medición de variables en campo

Una vez validado, probado y ajustado la conexión del sistema de transmisión en la red Mesh se procedió a realizar las pruebas de campo de las diversas variables medidas para cada uno de los nodos. En la Fig. 15 se presenta el resultado de la medición en campo para la variable temperatura en los tres nodos.

Cabe indicar que las pruebas de campo se realizaron durante varios días, para efectos del análisis estadístico se tiene en

cuenta el comportamiento y la adquisición de los datos durante un periodo aproximado de 72 horas.

En la Fig. 16 se visualizan el comportamiento de la variable humedad relativa en los tres nodos instalados

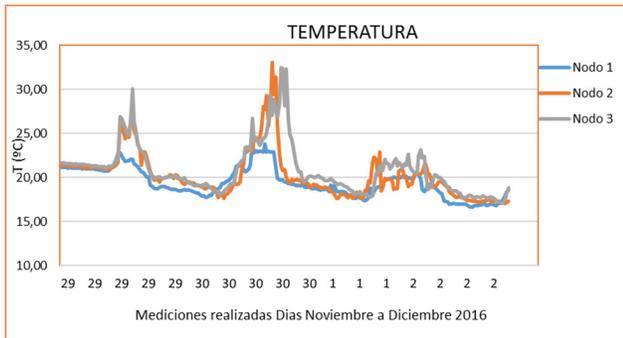


Fig. 15. Medición de la Temperatura en campo.

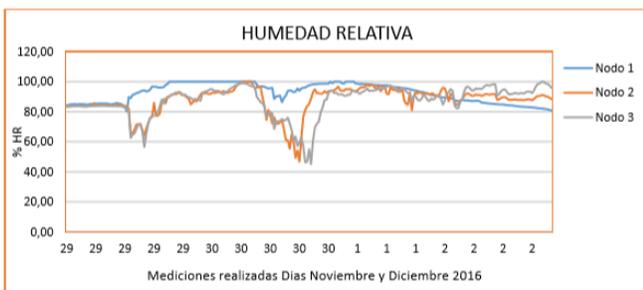


Fig. 16. Medición de la Humedad Relativa en campo.

En sistema implementado en la red permite realizar el análisis estadístico del comportamiento de las diversas variables en los nodos. En la tabla III se ilustra el comportamiento estadístico de la variable Temperatura.

TABLA III  
ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA EN CAMPO

| Estadística Descriptiva Temperaturas |                         |                         |                         |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Parámetro                            | Temperatura (°C) Nodo 1 | Temperatura (°C) Nodo 2 | Temperatura (°C) Nodo 3 |
| Media                                | 19,37                   | 20,21                   | 20,84                   |
| Error típico                         | 0,11                    | 0,17                    | 0,18                    |
| Mediana                              | 19,03                   | 19,59                   | 20,10                   |
| Moda                                 | 16,96                   | 17,67                   | 21,34                   |
| Desviación estándar                  | 1,68                    | 2,62                    | 2,83                    |
| Varianza de la muestra               | 2,81                    | 6,88                    | 8,00                    |
| Curtosis                             | -0,46                   | 4,22                    | 3,18                    |
| Coficiente de asimetría              | 0,44                    | 1,78                    | 1,60                    |
| Mínimo                               | 16,62                   | 17,07                   | 17,08                   |
| Máximo                               | 23,80                   | 33,06                   | 32,51                   |
| Suma                                 | 4863,04                 | 5071,70                 | 5229,98                 |
| Cuenta                               | 251,00                  | 251,00                  | 251,00                  |
| Nivel de confianza (95,0%)           | 0,21                    | 0,33                    | 0,35                    |
| CV                                   | 8,65                    | 12,98                   | 13,57                   |

#### IV. CONCLUSIONES

Se logra diseñar e implementar una red de sensores inalámbricos tipos Mesh para la medición de variables microclimáticas no sólo al interior del Relicto Vegetal Cedro Rosado sino al exterior y en el borde, facilitando la transmisión de los datos recolectados a una estación central de forma inalámbrica para su posterior procesamiento y análisis. Dada la configuración y topología implementada la red permite la instalación y expansión de nuevos nodos sensores y/o variables. Es de resaltar que el sistema fue implementado con base a la tecnología Libelium, sin embargo, la red permite la interacción y comunicación con otras tecnologías (Arduino, Raspberry-pi.).

Se estructuró una trama que contiene la información capturada por los nodos, facilitando el envío de la información a través de la red y su posterior uso en una plataforma que permita visualizar no solo las variables sino su comportamiento estadístico online.

Se adquiere nuevo conocimiento en el campo de las Tecnologías Inalámbricas y en especial en las Redes de Sensores Inalámbricos, en Instrumentación y en Medición de Variables Microclimáticas; esto abre un abanico de posibilidades para la investigación al interior del grupo GIDET adscrito al programa de instrumentación de la Universidad del Quindío.

Se adaptó la tecnología de Libelium disponible en el mercado para conformar los nodos de acuerdo a las especificaciones técnicas de diseño y requerimientos dados, de igual manera se deja abierta para la inclusión y adaptación de otras tecnologías a la red.

Al implementar una WNS se disminuyen costos de instalación y mantenimiento de redes cableadas que se lleguen a ser implementadas, se disminuyen gastos por desplazamiento de personal a las zonas para la toma de medidas, se permite la portabilidad del sistema a otras áreas que requieran ser monitorizada sin requerir de grandes presupuestos.

De los datos adquiridos de humedad relativa (Ver Fig. 16) se destaca que el nodo 1 alcanzó el máximo rango de medición, esto significa que se presentó fenómeno de rocío al interior del relicto.

El sistema implementado permite el análisis estadístico de las diversas variables y su comportamiento en los diferentes nodos, datos que sirven para hacer proyecciones y/o tomas de decisiones en los entornos ambientales.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al “Proyecto 754”, aprobado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad del Quindío,

que lleva como título: "Sistema de Instrumentación para el Monitoreo de Variables Microclimáticas en el Relicto Vegetal Cedro Rosado Universidad del Quindío Basado en una Red de Sensores Zigbee", macro proyecto en ejecución al cual pertenece intrínsecamente este proyecto, presentado por el Grupo de Investigación en Desarrollos Tecnológicos GIDET del Programa de Tecnología en Instrumentación Electrónica en asocio con el Programa de Biología; programas académicos pertenecientes a la Universidad del Quindío.

[14] DIGI, "XCTU User Guide", 2018. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/90001458-13/default.htm>.

## REFERENCIAS

- [1] M. F. Barcell, "Wireless Sensor Network", 2018. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>.
- [2] W. Dargie y C. Poellabauer, "*Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*", John Wiley & Sons Ltd. WILEY, 2010.
- [3] National Instruments, "¿Qué es una Red de Sensores Inalámbricos?", 2009. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.ni.com/white-paper/7142/es/#toc3>.
- [4] D. M. Archila C. y F. A. Santamaría B., "Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos", *Revista Digital TIA*, vol. 2, 2013.
- [5] M. Rodríguez B., "¿A quién le importa la biodiversidad en Colombia?", en *Nuestra diversidad*, Bogotá: Fundación Alejandro Ángel Escobar, CEREC, 1993, pp. 251-269.
- [6] DIGI, "DIGI XBEE-PRO 900HP", 2018. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.digi.com/pdf/ds\\_xbeepro900hp.pdf](https://www.digi.com/pdf/ds_xbeepro900hp.pdf).
- [7] Libelium, "Agriculture 2.0 - Technical Guide", 2018. [En línea]. Disponible en:  
[http://www.libelium.com/downloads/documentation/agriculture\\_sensor\\_board\\_2.0.pdf](http://www.libelium.com/downloads/documentation/agriculture_sensor_board_2.0.pdf).
- [8] Digikey, "MPX4115A", 2018. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.datasheetspdf.com/datasheet/search.php?sWord=mpx4115a>.
- [9] Alldatasheet, «SHT75», 2018. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/91103/ETC/SHT75.html>.
- [10] Irrometer, "Sensores de humedad del suelo", 2018. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.irrometer.com/sensors.html#wm>.
- [11] MicroController, "Sensor de radiación solar, SQ-110 Sensor Quantum PAR autoalimentado", 2018. [En línea]. Disponible en:  
[http://microcontrollershop.com/product\\_info.php?products\\_id=6895](http://microcontrollershop.com/product_info.php?products_id=6895).
- [12] Hetpro, "WEATHER STATION WS-3000", 2018. [En línea]. Disponible en: <https://hetpro-store.com/weather-station-ws-3000/>.
- [13] DIGI, "Wireless Mesh Networking", 2018. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.digi.com/pdf/wp\\_zigbeevsdigimesh.pdf](https://www.digi.com/pdf/wp_zigbeevsdigimesh.pdf).