

Modelo de despliegue de una WSN para la medición de las variables climáticas que causan fuertes precipitaciones

WSN deployment model for measuring climate variables that cause strong precipitation

José Gregorio Caicedo Ortiz¹, Melisa Andrea Acosta Coll², Alejandro Cama-Pinto³

¹Ingeniero Electrónico, Docente investigador. ²Magister en Ingeniería Eléctrica, Electromagnética Aplicada.

³Doctor en Tecnología de Invernaderos e Ingeniería Industrial y Ambiental.

^{1,2,3}Docente Investigador del grupo GIACUC adscrito al Programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad de la Costa (CUC). Barranquilla, Colombia.

E-mail: jcaicedo1@cuc.edu.co

Recibido 24/05/14, Aceptado 11/11/2014

Cite this article as: J. Caicedo, M. Acosta, A. Cama-Pinto, "WSN deployment model for measuring climate variables that cause strong precipitation", Prospect, Vol 13, N° 1, 106-115, 2015.

RESUMEN

Existen diferentes métodos y diseños para obtener datos de las principales variables medioambientales, como la temperatura, la presión atmosférica y la humedad que influyen en las precipitaciones causantes de inundaciones, uno de ellos son las redes inalámbricas de sensores (en inglés WSN) capaces de monitorizar variables físicas en tiempo real. Colombia es uno de los países latinoamericanos más afectados por las consecuencias del cambio climático, en especial el sur del Departamento del Atlántico, por lo tanto se presenta el modelo de despliegue de una WSN para medir las variables que influyen en las inundaciones en el sur del Departamento del Atlántico teniendo en cuenta las condiciones topográficas y climáticas propias del lugar.

Palabras clave: WSN, Modelo de despliegue, precipitaciones, inundaciones, Departamento del Atlántico, Colombia.

ABSTRACT

There are different methods and designs to get data from environmental variables such as temperature, atmospheric pressure and humidity that influence on rainfalls causing floods. One of those methods are the Wireless Sensor Networks (WSN) to monitor the physical variables in real time. Colombia is one of the most affected Latin American countries due the consequences of climate change, particularly in south zone of the Atlantic department. Therefore, here is presented a deployment model of a WSN to measure variables that influence flooding in the south zone of Atlantic department, considering the topography and climate of this site.

Keywords: WSN, Deployment model, Rainfall, Floods, Atlantic department, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

Las WSN hoy en día son consideradas la mejor opción para lugares donde no se pueden establecer enlaces óptimos entre emisores y receptores, ya que gracias a sus características pueden sustituir equipos costosos de alta complejidad por otros más sencillos y económicos con capacidades de cómputo suficientes para aplicaciones específicas, y con infraestructuras que permitan una mayor densidad espa-

cial [1]. Debido a esto se plantea un modelo de despliegue de WSN ubicado en el municipio de Santa Lucía para estudiar las variaciones que sufren las variables climáticas de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, consideradas como las principales influyentes en la formación de precipitaciones. Con esto también se pretende brindar una base tecnológica que suministre información constante para la futura implementación de un Sistema de Alertas Tempranas.

A continuación, en la sección 2, se hace un análisis del municipio de Santa Lucía donde se ubicará la WSN. En la sección 3 se explican las razones por la que se escogió el protocolo *ZigBee*, el *hardware* empleado, se habla de las topologías de red, el uso de las notaciones de *Schaffli* para desarrollar el modelo de despliegue de la WSN y la evaluación de los radioenlaces apoyado en simulaciones realizadas en el *software Radio Mobile*. En la sección 4 se presentan los resultados de las pruebas de campo realizadas en el municipio de Santa Lucía y finalmente las conclusiones.

2. MUNICIPIO DONDE SE UBICARÁ LA WSN

La WSN se encontrará ubicada en el Municipio de Santa Lucía localizado en las coordenadas 10°19' latitud Norte y 74°57' longitud Oeste al margen derecho del Canal del Dique. Abarcando el corregimiento de Algodonal y parte del Municipio de Suan [2]. Las características principales de Santa Lucía que contribuyen en el desarrollo de la WSN se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Características del Municipio de Santa Lucía [2].
Table 1. Characteristics of Santa Lucia's municipality [2].

Características del Municipio de Santa Lucía.	
Población total (2012)	13.694
Extensión total:	84 km ²
Extensión área urbana:	2 km ²
Extensión área rural:	82 km ²
Altitud de cabecera municipal:	8 metros sobre el nivel del mar
Distancia de referencia:	79.2 km. Capital del Dpto.
Temperatura media:	28° - 33°C
Precipitaciones:	169.86 mm en promedio anual.
Humedad relativa:	75%
Vientos:	No hay histórico de datos.

Entre los fenómenos naturales que afectan a este municipio destacan las inundaciones de Nivel I, siendo estas las de mayor preocupación por la gran cobertura que alcanzan sobre el territorio y por sus antecedentes históricos. En segundo lugar están las amenazas de Nivel III, las cuales se definen por ser de tipo limitadas y ocasionan daños pequeños de forma parcial o temporal [3].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Protocolo de red

3.1.1 Protocolo de comunicación *ZigBee*

ZigBee está definido como un conjunto de protocolos capaz de transferir datos hasta 250kbps para el desarrollo de redes inalámbricas de baja velocidad de datos, que puede operar en las bandas de frecuencias de 868 MHz, 915MHz y 2.4 GHz [4].

Aunque existe diversidad de protocolos este se elige por las siguientes razones:

- Se pueden integrar componentes inalámbricos de forma económica [5].
- Existen muchas aplicaciones con *ZigBee* relacionadas al estudio de las variables climáticas, que sirven como antecedentes, experiencias y documentaciones relevantes para el modelo de despliegue de la WSN.
- Diversidad de *hardware* que operan con este protocolo.
- Mayor cantidad de nodos 64.770 [6].
- Bajo consumo de la batería, indispensable para alargar el tiempo de vida de la red [7].

Por otro lado, en el grupo de investigación (GIACUC) de la Corporación Universidad de la Costa CUC se tiene experiencia con este protocolo, el cual se implementó en los siguientes proyectos: "Estudio del protocolo 6LoWPAN en una red de sensores inalámbricos para un sistema de alertas tempranas" y "Plataformas tecnológicas aplicadas al monitoreo climático".

3.2 Hardware

3.2.1 Equipos a Utilizar

La selección de los equipos a implementar en una WSN, varían de acuerdo a sus características, pero principalmente de la aplicación en particular, ya que esta define los parámetros que se deben tener en cuenta y facilita la selección de los dispositivos. Considerando investigaciones relacionadas con el estudio de variables atmosféricas se analizan diferentes fabricantes y las soluciones que estos ofrecen haciendo énfasis en dos empresas (ver tabla 2) [11], donde los parámetros que se evaluaron fueron las frecuencias de operación, el alcance máximo entre nodos y la autonomía máxima de los dispositivos.

Tabla 2. Análisis de fabricantes de equipos para WSN [11].
Table 2. Analysis of equipment manufacturers for WSN [11].

Empresa	Dispositivo	VARIABLES MEDIDAS	Frecuencia de operación	Alcance máximo	Autonomía máxima
Crossbow (MEMSIC en la actualidad)	MEM - SYS	Temperatura y humedad relativa del ambiente, radiación solar y presión barométrica	433 MHz	>150m	2 años
Crossbow (MEMSIC en la actualidad)	eKo	Temperatura y humedad del suelo, temperatura y humedad relativa del ambiente, radiación solar, precipitación, presión barométrica, velocidad y dirección del viento y humectación de la hoja.	2,4GHz	150 - 3200m	5 años, 3 meses sin sol
Libelium	Waspnote	Temperatura y humedad relativa del ambiente, temperatura y humedad del suelo, humectación de la hoja, presión atmosférica, radiación solar, diámetro del tronco/tallo/fruto, velocidad y dirección del viento y precipitación.	2400, 900, 868 MHz	7 - 24 - 40km	1 año

La primera empresa, *Crossbow* (actualmente *MEMSIC*), tiene algunos años comercializando equipos para estas soluciones como los *MEM-SYS* y su línea más importante el kit *eKo*, definido por el fabricante como equipos para agricultura de precisión, estudios de conservación, monitorización de cultivos y microclimas para ambientes exteriores [12].

La segunda empresa a resaltar es *Libelium*, spin off 2009/2010 de la Universidad de Zaragoza, con su dispositivo *Waspnote PRO*, capaz de integrar varios sensores para monitorizar entornos diversos gracias a su variedad de placas integradoras de sensores entre las que resalta la de agricultura, con cabida para monitorizar hasta 14 parámetros distintos, temperatura y humedad relativa del aire, temperatura del suelo, humedad de suelo, humectación de hoja, presión atmosférica, radiación solar, diámetro de tronco/tallo/fruto, velocidad de viento, dirección de viento y precipitación. Pueden transmitir información a distancias de hasta 7 km con línea de vista entre dispositivos y condiciones ideales utilizando el protocolo *ZigBee*, permitiendo abarcar grandes extensiones de tierra, o almacenar estos datos de manera local en el propio dispositivo gracias a que su diseño permite insertarles memorias micro SD [13]. En la tabla 3 se pueden apreciar los datos generales del *Waspnote PRO*.

Tabla 3. Datos Generales del *Waspnote* [13].
Table 3. *Waspnote* General Data [13].

Datos generales del <i>Waspnote PRO</i> .	
Microcontrolador	ATmega1281
Frecuencia	8MHz
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Flash	128KB
SD Card	2GB
Peso	20gr
Dimensiones	73.5 x 51 x 13 mm
Rango de temperatura	[-20°C, +65°C]
Reloj	RTC(32KHz)
Consumo de energía	
On	9mA
Sleep	62µA
Deep Sleep:	62µA
Hibernate	0.7µA

Aspectos como los mencionados anteriormente, además de la capacidad que tiene Libelium para operar en redes multifrecuencias con su tarjeta *expansión radio board*, que permite conectar dos radios al mismo tiempo para aplicaciones de redes híbridas, son puntos a favor para escogerla como la tecnología a evaluar en la WSN propuesta [13].

En la tabla 4 se pueden apreciar las características de transmisión de los *Waspnotes PRO*, información que se utiliza para realizar los cálculos matemáticos referentes a los presupuestos de enlaces entre nodos.

Tabla 4. Características de comunicación del *Waspnote* modelo XBee-ZB-Pro [13].

Table 4. *Waspnote XBee-ZB-Pro* features communication [13].

Características de transmisión del <i>Waspnote PRO</i>	
Modelo	Xbee - ZB - Pro
Protocolo	<i>ZigBee</i> - Pro
Frecuencia	2,4GHz a 2,47Ghz
Potencia de transmisión	50mW(17dBm)
Sensibilidad	-102dBm
Número de canales	14
Rango	7000m

El *Waspnote ZB PRO*, el *Waspnote Gateway ZB PRO* ambos con antena de 5 dBi, la placa *Agriculture Sensor Board* de Libelium, un sensor de presión atmosférica de referencia MPX4115A, un sensor de humedad referencia 808H5V5 y un sensor de temperatura MCP9700A (figura 1), se eligen como *hardware* a evaluar en el modelo de despliegue de la red. Para un análisis más detallado de estas placas, revisar [13].

Figura 1. Equipos Libelium probados en campo.
Figure 1. Libelium equipment tested on field.



3.3 Topología de la WSN

Las topologías que se pueden implementar en el protocolo *ZigBee* pueden ser apreciadas en la tabla 5.

Tabla 5. Características principales de las topologías de red [1, 4, 7].

Table 5. Main characteristics of network topologies [1, 4, 7].

Parámetros a tener en cuenta	Malla	Árbol	Estrella
Escalabilidad	Sí	Sí	No
Eficiencia energética	No	Sí	Sí
Redundancia de rutas	Sí	No	No
Movilidad de nodos	Sí	Parcial	parcial

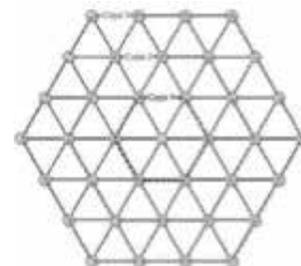
Para el modelo de despliegue se escoge la topología en malla para el monitoreo de variables medioambientales, por las siguientes razones:

- Provee escalabilidad.
- Provee redundancia de caminos debido a que cada nodo actúa como routers transmitiendo los datos hasta el nodo *Gateway*.
- Se logra abarcar una mayor cobertura sobre la zona en estudio gracias a la escalabilidad y la redundancia de caminos [8].

De acuerdo a la topología escogida, se hace uso del concepto de teselación el cual se entiende como un embaldo compuesto por polígonos regulares con capacidad para cubrir un área determinada sin que se traslapen. Estas teselaciones son determinadas a través de las notaciones de *Schalfli*, entre las que destacan, las formadas por triángulos equiláteros de la figura 2, también cuadrados y hexágonos[9].

Se opta por las teselaciones formadas por triángulos ya que así cada nodo mantiene una conexión equidistante con sus vecinos, logrando una similitud en los tiempos de propagación de la información, se realiza una mejor distribución de los nodos sobre la zona en estudio y se facilita el análisis del funcionamiento de la red.

Figura 2. Teselación formada por triángulos equiláteros [9].
Figure 2. Tessellation formed by equilateral triangles [9].

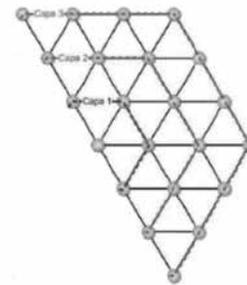


Con esta distribución surge el concepto de capas, definidas como una agrupación de nodos alrededor de un nodo central a diferentes profundidades. De acuerdo al número de capas es posible calcular el número de nodos a utilizar en una topología dada, así se puede controlar que la cantidad de nodos no sea arbitraria y excesiva sino que se rija bajo parámetros matemáticos [9]. Para el caso de la teselación triangular se emplea la fórmula 1, donde C es el número de capas y N el número final de nodos:

$$N = 1 + 3C(C + 1) \quad (1)$$

Con la ubicación geográfica donde se encontrará la WSN y el patrón de topología escogido, se posiciona al nodo coordinador o *Gateway* con características *FFD* (*Full Function Device*) en la zona urbana del municipio de Santa Lucía y se puede notar que algunos de los nodos pertenecientes a las capas que estarán alrededor de este sobrepasan los límites del Departamento del Atlántico, por lo tanto se opta por implementar la teselación a medias capas observado en la figura 3.

Figura 3. Teselación triangular, Medias Capas.
Figure 3. Tessellation triangular, half layers.



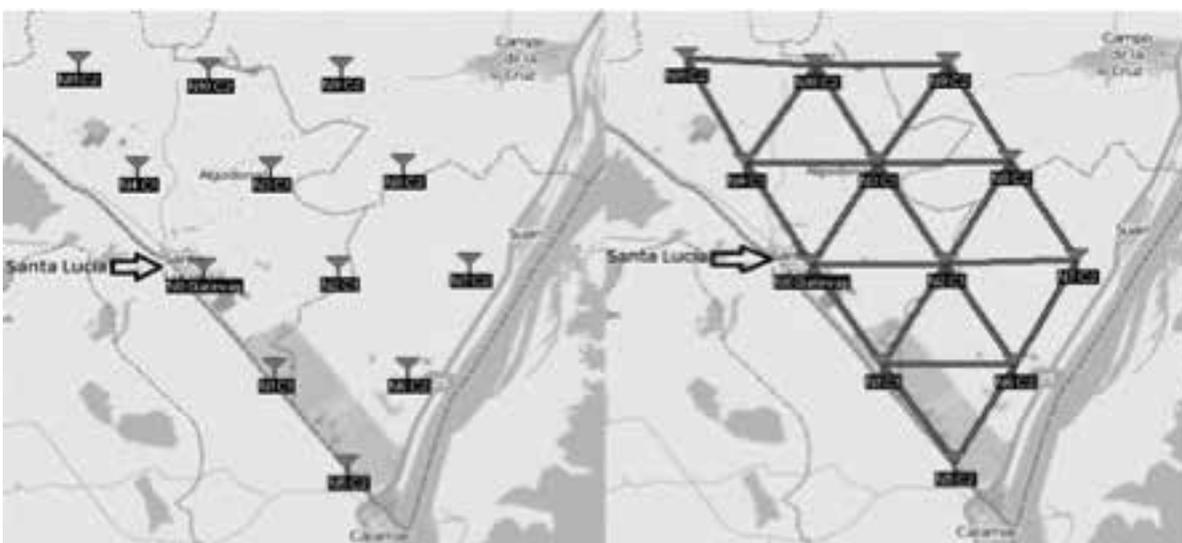
Aplicando la fórmula relacionada anteriormente, para evitar la mayor cantidad de saltos en una red de dos capas (suficientes para abarcar a Santa Lucía en su totalidad) hasta el *Gateway* se tiene:

$$\begin{aligned} C &= 2 \\ N &= 1 + 3(2)(2 + 1) && De(1) \\ N &= 19 \end{aligned}$$

Para dos capas la cantidad de nodos calculados es de 19, pero teniendo en cuenta que por las condiciones geográficas del terreno se utilizarán solo la mitad de las capas, se reduce la cantidad de nodos a un total de 12 distribuidos de manera homogénea. A continuación se presenta el modelo de despliegue sobre el territorio del municipio de Santa Lucía, figura 4.

Figura 4. Ubicación geográfica de la WSN. Modelo desarrollado con *Radio Mobile*, las líneas verdes indican la efectividad del enlace.

Figure 4. Geographical location of WSN. Model developed with *Radio Mobile*, green lines indicate an effective link.



Como se aprecia en la figura 3, el nodo coordinador o *Gateway FFD (Full Function Device)* está ubicado en la parte urbana del municipio ya que debe tener una conexión constante a una fuente de energía. A partir de la ubicación de este nodo se realiza el despliegue de los 11 nodos (*FFD*) routers restantes, los cuales se identifican con la siguiente nomenclatura **N#C#**, donde **N#** indica el número del nodo y **C#** el número de la capa a la que pertenece, a excepción del **N0** que representa al *Gateway*.

Respetando el patrón establecido, todos los nodos se encontrarán a una distancia aproximada de 3500 m entre ellos, equivalente a la mitad del alcance máximo de los equipos escogidos, logrando abarcar de esta manera los municipios de Santa Lucía y Suan, minimizando los factores que pueden influir en la transmisión y recepción de la información, como lo es la vegetación y la geografía propia del terreno.

Cada nodo estará conformado por un sensor de temperatura, uno de presión, uno de humedad y una estación *meteorológica* compuesta esta última de un pluviómetro, un sensor de velocidad y dirección del viento debido a que son los elementos principales que definen el clima. Analizando el comportamiento en el tiempo y el espacio de estas variables es posible obtener conclusiones sobre el estado del clima y sus variaciones[10].

3.4 Evaluación de los enlaces entre nodos

Con los equipos y la distancia definidos para la *WSN*, se realiza el presupuesto de enlace, partiendo de la sumatoria de la potencia del transmisor, ganancia de la antena del transmisor, pérdidas en los cables y conectores de la antena del transmisor y receptor, para obtener la ganancia total, luego se calculan las pérdidas en el espacio libre, utilizando una distancia entre nodos de 3500 m, y así poder deducir si la señal es suficiente para que el transmisor y el receptor estén comunicados.

Tanto el nodo transmisor y el receptor estarán conformados por equipos de la misma referencia, el *Waspnote Xbee-ZB-Pro*. Las conexiones de las antenas a las placas de transmisión son a través de conectores *RPSMA*, se evalúan pérdidas de 1,3dB considerando que las antenas del transmisor y del receptor se encuentran a 13 m sobre el suelo (aunque también las alturas de las antenas se pueden ver afectada por las condiciones del terreno). Por consiguiente se estima que los parámetros de comunicación serán los mismos en ambos sentidos[14]. A continuación se realiza el cálculo para el presupuesto de enlace que consiste en hallar la ganancia total del sistema; a este valor se le resta las pérdidas del espacio libre (L_{fsl}) que se producen cuando la señal viaja por el trayecto comprendido entre el emisor y receptor, y a esta sustracción se la compara con el

nivel de sensibilidad del receptor para determinar la factibilidad de llevar a cabo el enlace. En el caso de nuestro sistema tenemos:

+Potencia del Tx(17 dbm)
 +Ganancia de la antena Tx (5 dbi)
 -Pérdidas en los cables del Tx(1,3 db)
 +Ganancia de la antena Rx(5 dbi)
 -Pérdidas en los cables del Rx(1,3 db)
 Ganancia total (24,4db) (2)

A partir de la ecuación de Friis [15, 16] se puede calcular la pérdida en el espacio libre del trayecto para una longitud de 3500 metros con la siguiente fórmula:

$L_{fsl} = 20\log(f) + 20\log(10(d)) - 147.56 \text{ dB}$; *f*: frecuencia en Hz y *d*: distancia entre Tx y Rx en metros.

$L_{fsl} = 20\log(2.4) + 20\log(3500) - 147.56 \text{ dB}$

$L_{fsl} \approx 110.93 \text{ dB}$ (3)

Al tener la ganancia total y las pérdidas en el espacio libre, se obtiene el nivel de la señal que llegará al receptor con la siguiente fórmula.

Ganancia total (24,4 dB)
 - Pérdidas en el espacio libre (110.93 dB)
 Nivel de la señal en Rx (-86,53 dBm) (4)

Margen de tolerancia de la señal = Nivel de la señal que llega a Rx - Sensibilidad Rx (5)

Reemplazando valores:

Margen de tolerancia de la señal = -86.53 dBm - (-102dBm) = 15.47 dB De (5)

Como se puede observar, -86.53 dBm es mayor que la sensibilidad del receptor (-102 dBm), por lo cual el nivel de señal es suficiente para que haya comunicación entre ambos dispositivos inalámbricos. De acuerdo a resultados experimentales con un margen de tolerancia superior a los 10 dB es posible el enlace con rendimientos que van desde el 70% al 100%, inferior a este valor el enlace no es posible [17] Con el margen de tolerancia obtenido (15.47 dB) se asegura que los enlaces se llevan a cabo. Es relevante tener en cuenta que estos son cálculos donde no se están considerando el clima, la vegetación, entre otros factores que añaden pérdidas en los enlaces.

3.5 Simulaciones realizadas con el software *Radio Mobile*

Para evaluar si el presupuesto de enlace calculado es viable, se optó por utilizar el software gratuito *Radio Mobile* [18] en su versión 11.4.6, herramienta que permite simular

los enlaces de radio microondas que operan en el rango de 20 MHz a 20 GHz y que modela los planos del relieve del lugar de estudio por lo que es una simulación con valores bastante similares a los que se obtienen en la realidad. Este software permite emular las características del sistema de comunicación inalámbrico incluyendo los parámetros de cada equipo.

Con las distancias especificadas entre un nodo y sus vecinos de aproximadamente 3500 m, se realizaron las simulaciones de los enlaces, estimando que los puntos que conforman una WSN o cualquier red, varían con las condiciones del terreno. Se aprecia que los valores arrojados por el software son aproximados a los calculados, y que el enlace es posible en las condiciones planteadas con 0% en pérdidas por vegetación, ver figura 5.

Figura 5. Resultados de la simulación del enlace entre N0Gateway y N1C1 con antenas de 13 m de altura.

Figure 5. Simulation results between N0Gateway and N1C1 with antennas height of 13m.



Se agregan pérdidas del 10% por causas de vegetación en los parámetros del software dado que se trata de una llanura con pastizales, y se analizó el comportamiento del enlace, demostrando que sigue superando el rango de tolerancia de los 10 dB[17].

En la tabla 6 se observan los resultados de las pruebas realizadas con *Radio Mobile*, y se nota que entre más se aproximan las distancias entre nodos a la establecida de 3500 m para el modelo de despliegue, el margen de tolerancia de la señal que recibirán los nodos receptores se mantendrá por encima de los 10dB, proporcionando un enlace estable para la red.

Tabla 6. Pruebas de tres enlaces, hechas con *Radio Mobile*.
Table 6. Test of three links using *Radio Mobile* software.

Pruebas hechas con <i>Radio Mobile</i>			
Enlace	Distancia entre nodos	Ganancia sin pérdidas por vegetación	Ganancias con pérdidas del 10% por vegetación.
N0Gateway - N1C1	3,49 km	14,4dB	11,7 dB
N0Gateway - N2C1	3,49 km	14,3dB	10,8 dB
N1C1 -N2C1	3,44 km	14,1dB	10,4 dB

Teniendo en cuenta que no se cuenta con la infraestructura necesaria para elevar los nodos a 13m en las pruebas de campo, estas se realizaron con mástiles de 1m de altura. Lo que se pudo estimar en la simulación es que a esta altura y distancia entre nodos de 3500m no se establecía comunicación en el enlace tal como se corroboró en la realidad. Ver figura 6.

Figura 6. Resultados de la simulación del enlace entre N0Gateway y N1C1 con antenas de 1m de altura.

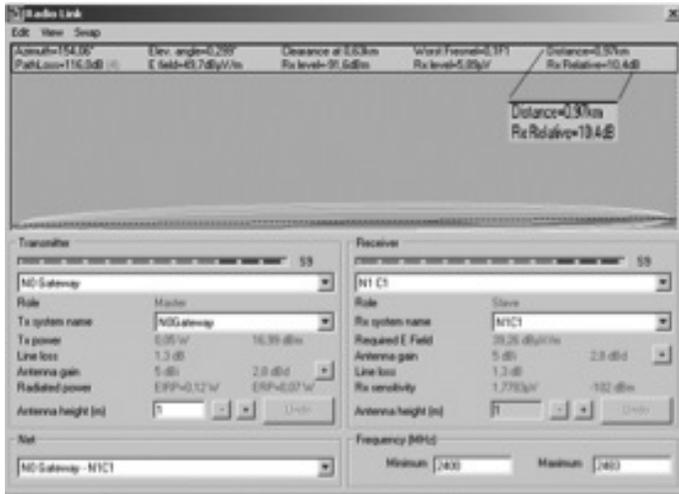
Figure 6. Simulation results between N0Gateway and N1C1 with antenna height of 1m.



Para evitar las limitaciones de logística en las pruebas de campo (se contó con mástiles de 1m), se utilizó una distancia entre los nodos de 1000m, con lo cual se logró establecer comunicación eficiente entre nodo emisor y nodo receptor, esto se corroboró previamente en la simulación (ver figura 7).

Figura 7. Resultados de la simulación del enlace entre N0Gateway y N1C1 con antenas de 1m de altura y una distancia de 1000m entre nodos.

Figure 7. Simulation results between N0Gateway and N1C1 with antennas height of 1m and a distance of 1000m between nodes.



4. RESULTADOS

La primera prueba consistió en captar información de las tres variables mencionadas con el *Waspnote* conectado directamente a un equipo de cómputo portátil en la entrada de Santa Lucía a las 12 pm hora Colombiana. Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 7, donde la temperatura alcanza su punto máximo entre los 40° y 44°C, por lo que la presión de saturación se incrementa y la humedad relativa tiende a disminuir manteniéndose estable entre los 30 y 35% (valores mínimos) inferior al valor promedio del municipio, mientras que la presión se mantuvo constante en 110 kPa[19]. Por otro lado los valores máximos de humedad relativa se alcanzan en las primeras horas del día, momento en el cual la temperatura es la mínima [20]. Es indispensable resaltar que en el clima tropical la temperatura disminuye 1 ° C cada 180 m a medida que aumenta la altura, mientras que la presión atmosférica disminuye aproximadamente 1 mbar cada 9 metros de altura[21].

Tabla 7. Resultados con el *Waspnote* conectado al PC.
Table 7. Results with the *Waspnote* connected to a PC.

Resultados primera prueba		
Temperatura	Humedad	Presión
41,6129°C	35,9347%	110,1625 kPa
43,2258°C	39,0565%	110,4068 kPa
46,4516°C	36,9753%	110,2846 kPa
43,2258°C	27,08983%	109,9181 kPa
42,9032°C	35,9347%	110,1625 kPa
43,2258°C	34,0275%	110,1625 kPa

La segunda prueba consistió en verificar la comunicación inalámbrica de los equipos, tabla 8, por lo cual el nodo *Waspnote* que contenía los sensores fue llevado a una distancia aproximada de 1000 m, y la comunicación entre ambos fue efectiva. Los valores que se recibieron en el nodo *Gateway* se mantuvieron similares a los obtenidos en la primera prueba.

Tabla 8. Resultados prueba de distancia de 1000m.
Table 8. Distance test results for 1000m.

Resultados segunda prueba		
Temperatura	Humedad	Presión
41,6129°C	35,9347	110,1625kPa
43,2258°C	39,0565	110,4068kPa
46,4516°C	36,9753	110,2846kPa
43,2258°C	27,0898	109,9181kPa
42,9032°C	35,9347	110,1625kPa

En la tercera y última prueba se evaluó el enlace entre el nodo y el *Gateway* a la distancia aproximada de 3500 m con antenas instaladas sobre soportes de 1m y no se estableció el radioenlace, las antenas no se elevaron a 13m respecto al nivel del suelo debido a que no se contaba con la infraestructura. Los resultados de las pruebas de campo fueron los esperados de acuerdo a las simulaciones previas con el software *Radio Mobile*. De igual forma se observó que los equipos funcionan de manera adecuada estando a la intemperie a pesar que está diseñados para pruebas de laboratorio. La línea de equipos para operar al aire libre de Libelium son los *Waspnote Plug & Sense* [13].

5. CONCLUSIONES

- Se ha diseñado el modelo de despliegue de una red inalámbrica de sensores aplicada al ámbito climático que permite monitorizar parámetros atmosféricos en un sector del sur del Departamento del Atlántico en Colombia. Conformada por un nodo *Gateway* o coordinador y 11 nodos routers con una placa integradora de sensores para medir los parámetros deseados, basados en tecnología desarrollada por la empresa Española Libelium. Se analizaron los presupuestos de enlaces luego se compararon los resultados con simulaciones hechas en el software *Radio Mobile*, obteniendo valores parecidos a los calculados matemáticamente. Por último se realizaron pruebas experimentales en el Municipio de Santa Lucía obteniendo resultados favorables, demostrando la viabilidad de implementar esta tecnología y realizar trabajos futuros relacionados con las redes de sensores inalámbricas aplicadas al estudio de las precipitaciones.

- Durante el desarrollo de las pruebas de campo se corroboró que el enlace se ve afectado por la topología propia del terreno y que a la distancia de 3500m es necesario contar con una infraestructura que eleve la posición de las antenas respecto al suelo para asegurar una línea de vista efectiva entre los dispositivos, situación que ya se había previsto en las simulaciones.
- Por lo tanto se concluye que las WSN son la mejor opción ante problemáticas donde la información debe ser captada desde diferentes puntos en grandes extensiones de tierra, y se deba garantizar que la información llegue al nodo *Gateway* sin importar la ruta que tomen los datos en la red con un máximo ahorro energético por parte de los equipos debido a que muchos de los dispositivos se encontrarán a la intemperie sin suministros continuos de energía en zonas aisladas. Estas redes son relativamente económicas ante otras soluciones y permiten monitorear diferentes parámetros sin la necesidad de realizar grandes variaciones en la configuración de la misma. El modelo planteado cumple con estas condiciones y se considera replicable en entornos de similares condiciones topográficas y climáticas.

REFERENCIAS

- [1] E.O., Sosa, "Contribución al establecimiento de una red global de sensores inalámbricos interconectados", Tesis PhD, Universidad Nacional de la Plata, Argentina, 2011.
- [2] Alcaldía de Santa Lucía, "Alcaldía de Santa Lucía - Atlántico Por un desarrollo comunitario y con dignidad" [online]. Alcaldía de Santa Lucía, 2014 Disponible en: <http://www.santalucia-atlantico.gov.co>
- [3] Consejo municipal para la gestión del riesgo de desastres, "Plan de gestión de riesgo 2012 - 2015, Alcaldía de Santa Lucía - Atlántico Por un desarrollo comunitario con dignidad" [online]. Disponible en: <http://santalucia-atlantico.gov.co>
- [4] S., Farahani, "ZigBee Wireless Networks and Transceivers". Elsevier-Newnes, USA, 2008.
- [5] M.E, Pico, B.S., Castro, "Análisis de desempeño de redes de Sensores Inalámbricos en Tiempo Real aplicadas a Monitorización Volcánica", Proyecto de grado, Universidad ESPE, Sangolquí, 2012.
- [6] M. A, Arias; M.A, Vilchis; R.S, Ortigoza; M.M, Melchor; E.A, Flores, "Revisión del proceso de identificación de nodos en las wireless sensor networks", Telematique, vol. 8, n.o 1, pp. 1-23, sep. 2010.
- [7] J.S, Lee; Y.W, Su; C.C, Shen, "A Comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi", Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 33rd IECON, 2007, pp. 46-51.
- [8] A., Cama; F.G., Montoya; J., Gómez; J.L, De La Cruz; F., Agugliaro, "Integration of communication technologies in sensor networks to monitor the Amazon environment", J. Clean. Prod., vol. 59, pp. 32-42, nov. 2013.
- [9] M.E., Gil, "Estudio de la eficiencia de encaminamiento del protocolo AODV en redes ad hoc inalámbricas de gran escala", Trabajo de grado, Rey Juan Carlos, España, 2008.
- [10] G., Poveda, "La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria", Rev Acad Colomb Cienc, vol. 28, n.o 107, pp. 201-222, 2004.
- [11] J.A, López, "Contribución a las redes de sensores inalámbricos estudio e implementación de soluciones *hardware* para agricultura de precisión", Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2011.
- [12] "Memsic technical documentation". [online]. Disponible en: <http://www.memsic.com/support/technical-documentation.cfm>
- [13] Libelium, "Waspmote datasheet, Libelium documentation" [online]. 2014. Disponible en: http://www.libelium.com/downloads/documentation/waspmote_datasheet.pdf
- [14] W.L, Stutzman; G.A, Thiele, "Antenna Theory and Design", Tercera edición. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [15] Y., Liu; K., Contractor; Y, Kang, "Path loss for short range telemetry. Path loss for short range telemetry", IFMBE Proceedings. 4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks. Volume 13, 2007, pp. 70-74.
- [16] B., Rankhamrat; S, Promwong, "Wireless ultra wide-band transmission experiments". 19th IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Artículo número 6146168, 2011.
- [17] M, Zennaro; A, Bagula; D, Gascon; A.B, Noveleta, "Long distance wireless sensor networks: simulation vs reality", en Proceedings of the 4th ACM Workshop on Networked Systems for Developing Regions, New York, NY, USA, 2010, pp. 12:1-12:2.
- [18] Radio Mobile WEB Site [online]. 2014, Disponible en <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>

- [19] IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Online]. 2014, Disponible en: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/index.jsf>
- [20] J.F, Murcia, "Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100)", IDEAM, Bogotá, D.C., Informe técnico 005-2010, may 2010.
- [21] M.A, Acosta, "Clutter elimination methods and data merging for x band weather radar network in complex terrains". Tesis de maestría, University of Puerto Rico Mayagüez Campus, Puerto Rico, 2011.