

Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia

Design of a wireless sensor network for monitoring of flash floods in the city of Barranquilla, Colombia

Alejandro Cama-Pinto¹ Gabriel Piñeres-Espitia^{1*} Ronald Zamora-Musa¹
Melisa Acosta-Coll¹ José Caicedo-Ortiz¹ Jorge Sepúlveda-Ojeda¹

Recibido 26 de mayo de 2015, aceptado 14 de marzo de 2016

Received: May 26, 2015 Accepted: March 14, 2016

RESUMEN

En Barranquilla, Colombia el riesgo de muerte de personas y pérdidas materiales asociadas con las inundaciones repentinas en las calles de la ciudad es alta. Por ello, el presente artículo muestra el diseño de una arquitectura de red de sensores inalámbricos o WSN (*Wireless Sensor Network*) para monitorear en tiempo real parámetros atmosféricos que influyen en la detección del nivel de peligrosidad de inundaciones repentinas o los llamados familiarmente “arroyos”, producto de las súbitas e intensas lluvias en un breve período de tiempo. El diseño de la red se hizo por medio de un estudio de sitio o *site survey* para obtener los datos y resultados que son usados en el presente trabajo. Se ha desarrollado también una aplicación web móvil que utiliza el lenguaje unificado de modelado (UML®) basado en un listado de requerimientos que muestra en tiempo real, sobre un mapa de las calles de la ciudad el nivel de peligrosidad del arroyo en diferentes puntos de su trayectoria. El sistema diseñado será de utilidad para la toma de decisiones preventivas por parte del usuario final y, además, está desarrollado para que sea replicable y escalable en entornos similares. Además, en este trabajo se ha probado la plataforma Wasmote y los módulos XBee-PRO ZB (S2) como herramienta tecnológica para la WSN.

Palabras clave: Red de sensores inalámbricos (WSN), arroyos, Barranquilla, aplicación web móvil, XBee-PRO ZB (S2), ZigBee, desastres naturales, Sistema de Alertas Tempranas (SAT).

ABSTRACT

In Barranquilla, Colombia, the risk of deaths and property losses is associated with flash floods in the streets, which is very high. Therefore, this paper shows the design of a wireless sensor network to monitor real-time hydrological parameters that influence the detecting of dangerousness level of flash floods familiarly known as “arroyos”, product of sudden and heavy rains in a short time. The design of the network is made through a site survey to obtain the data and results that are used in this work. It has also developed a mobile web application that uses the Unified Modeling Language (UML®) based on a list of requirements that displays real-time, on a street map of the city the dangerousness level of the stream at different points along its path. The designed system will be useful for preventive decision making by the end user and it is further developed to be replicable and scalable in similar environments. Furthermore, in this work it was tested the platform Wasmote and the XBee-PRO ZB (S2) Modules as a technological tool for the WSN.

Keywords: Wireless sensor network (WSN), flash floods, Barranquilla, XBee-PRO ZB (S2), Zigbee, mobile web application, natural disasters, Early Warning System (EWS).

¹ Facultad de Ingeniería. Universidad de la Costa. Calle 58 # 55 - 66. Barranquilla, Colombia. E-mail: acama1@cuc.edu.co; gpineres1@cuc.edu.co; rzamora2@cuc.edu.co; macosta10@cuc.edu.co; jcaicedo1@cuc.edu.co; jssepulve3@cuc.edu.co

* Autor de correspondencia

INTRODUCCIÓN

Una red de sensores inalámbricos o WSN (*Wireless Sensor Network*) se compone de una serie de sensores de diversos tipos distribuidos espacialmente e interconectados por una red de comunicaciones inalámbrica formando nodos, los que monitorizan de forma cooperativa condiciones físicas o ambientales [1].

Una WSN por sus características puede ser parte de un Sistema de Alertas Tempranas (SAT), o EWS por sus siglas en inglés *Early Warning Systems*, quienes tienen componentes esenciales asociados a recopilación de datos, control, detección y reacción ante riegos en el entorno, siendo la tecnología WSN capaz de ofrecer estos servicios [2].

De la misma manera se puede mencionar que un SAT está conformado por dispositivos de monitoreo, cuya función principal es reducir al mínimo o evitar los daños producidos por amenazas de distintos tipos en la propiedad pública o privada, al medio ambiente, a los medios de subsistencia y a la humanidad en general [3-4].

Una de estas amenazas son las inundaciones repentinas, fenómenos hidrológicos que se forman muy rápidamente y son difíciles de predecir, como las que ocurren en la ciudad de Barranquilla, que han sido mortales y causan daños a la propiedad tal como el que se muestra en la Figura 1 conformada por imágenes obtenidas del diario *El Herald* de esta ciudad. Existen registros desde el año 1961 a la fecha de muertos y desaparecidos con un saldo de 62 fallecidos [5]; debido a estos hechos la alcaldía de Barranquilla fue sancionada por el Consejo de Estado y obligada a indemnizar a familiares de las víctimas. Después del acontecimiento se ha señalado el camino por donde pasan los arroyos, pero esta medida ha sido insuficiente. Estas inundaciones son productos de la combinación de la intensidad y duración de la precipitación y el proceso de producción de escorrentía rápida, además de factores hidrológicos, como las características del suelo y las cuencas hidrográficas donde los flujos de escorrentía definen su nivel de riesgo [6].

Este trabajo propone un sistema de monitoreo de las condiciones ambientales en tiempo real



Figura 1. Ejemplo de arroyos en Barranquilla.

donde pasa el arroyo basado en una WSN que puede monitorizar variables climatológicas como temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, intensidad de lluvia, velocidad y dirección del viento en la ciudad de Barranquilla para mitigar las secuelas que ocasionan a su paso. Este tipo de sistemas se emplean en aplicaciones similares a la propuesta e incluso en temas asociados a la salud y el bienestar de las personas [7-8].

El diseño toma como referencia el recorrido del arroyo “La Brigada”, cuyas características de los suelos y las cuencas hidrográficas que lo delimitan provocan la formación de las inundaciones repentinas por el alto porcentaje de superficie impermeable, una pendiente pronunciada; y adicionalmente por el pobre drenaje de aguas pluviales.

Hoy en día, inundaciones urbanas a nivel general [9-10] se pueden monitorear a través de un Sistema de Alertas Tempranas, sin embargo, en el caso de Barranquilla, teniendo en cuenta las condiciones hidrológicas anteriormente descritas, hace que sea particularmente agresivo y repentino, por lo que su estudio es de los pocos existentes a nivel mundial. En consecuencia este proyecto tiene la intención de diseñar una red piloto de sensores inalámbricos a lo largo de diferentes puntos del arroyo llamado “La Brigada”, que permita monitorear en tiempo real parámetros hidrológicos, como la intensidad de lluvia, para que en una siguiente fase sean procesados y se emitan alertas a la comunidad sobre el estado del arroyo y permitan tomar decisiones oportunas.

La arquitectura de esta WSN será el núcleo tecnológico de un futuro Sistema de Alertas Tempranas que servirá para correlacionar las condiciones ambientales y la formación de un arroyo. La WSN hace uso de la plataforma Waspote combinada con sensores de temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, anemómetros y pluviómetros.

En la sección a continuación se mencionan aspectos de las WSN en Sistemas de Alertas Tempranas; seguidamente, se detallan los aspectos relacionados a la red de sensores inalámbricos y las ventajas de su uso; en la penúltima sección se muestra el diseño de la WSN para la monitorización de un arroyo; luego se detallan los resultados más importantes y finalmente se muestran comentarios a manera de conclusión y trabajo futuro.

REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN) - EN SISTEMA DE ALERTAS TEMPRANAS (SAT)

Las Redes de Sensores Inalámbricos o WSN (*Wireless Sensor Networks*) están conformadas principalmente por microsensores los que están desplegados en una región a monitorizar y estos al ser integrados permiten a la red examinar, recolectar, procesar y transmitir datos de variables dentro del área de cobertura por medio del control de sus parámetros asociados [11].

De acuerdo a [12-15] comparando WSN con sistemas tradicionales de monitorización en tiempo real, esta presenta varias ventajas como su despliegue e instalación en entornos complicados o de difícil acceso, donde las instalaciones de redes tradicionales no podrían llevarse a cabo; adicionalmente el protocolo de enrutamiento y los algoritmos distribuidos de una WSN permiten a los sensores ser reconfigurados y sus enlaces de comunicación pueden ser establecidos dinámicamente.

Una desventaja frente a los sistemas tradicionales es que los sensores pueden quedar desconectados o fuera de línea en cualquier momento debido a diferentes causas como fuente de poder agotada, cambios en la condiciones de configuración y cambios de posición de los nodos por causas ajenas al sistema. Consecuentemente una topología WSN ofrece la ventaja de adaptarse ante situaciones de interrupción de comunicación.

Las WSN pueden hacer parte de un Sistema de Alerta Tempranas (SAT) donde las amenazas y alarmas que son monitorizadas varían según su peligrosidad, de acuerdo a la zona geográfica (en referencia a fenómenos naturales) y dentro de un país teniendo en cuenta las condiciones políticas y socioeconómicas [16].

De acuerdo a [17] los peligros o amenazas se pueden clasificar de la siguiente manera: Eventos de inicio lento o progresivo, y Eventos continuos, rápidos y repentinos. En este último se encuentran los riesgos hidrometeorológicos, que originan los arroyos en la ciudad de Barranquilla.

Trabajos previos abarcan una variedad de temáticas asociadas a WSN para la monitorización de

inundaciones repentinas, por ejemplo en [18] se propone una arquitectura a nivel general para construir un futuro prototipo donde la amenaza es el desbordamiento de un río y plantean dos alternativas para recolectar los datos del sistema, una de forma fija y otra de forma móvil; por otro lado, en [19] se hace uso de una WSN para predicción de amenazas pero concentrándose en técnicas de Machine Learning y en [20] se realiza un análisis de rutas de presencia de inundaciones pero no se diseña la red para monitorizar la amenaza.

En [21] se describe arquitectura de una WSN para monitorizar inundaciones de un río, se muestran plataformas a usar, pero no se registran pruebas, y en [22] se desarrolla un software para la recolección de datos pero al igual que en [18] y [21] no se realizan pruebas de campo.

Los sistemas anteriores comparten características similares, por ejemplo, diseño de la arquitectura de la WSN enfocados a detectar peligrosidad en desbordamiento de ríos sin la realización de pruebas de campo. Por el contrario en el diseño de esta investigación se efectuaron pruebas de campo para obtener conclusiones acerca de los distintos tipos de escenarios de propagación posibles, además y como factor innovador, en esta WSN se trabaja sobre las inundaciones que se presentan dentro de la ciudad de Barranquilla por la acción directa de la lluvia.

Por otro lado, en un SAT además de tener en cuenta los dispositivos que los componen, también es necesario relacionarlos con la comunidad para que sean parte activa del Sistema de Alertas Tempranas; con respeto a esta necesidad y de acuerdo a [16] y [23] un efectivo y completo SAT se conforma por cuatro elementos interrelacionados entre sí: conocimiento del riesgo, servicios de control y alerta, difusión y comunicación, y capacidad de respuesta; en los que una WSN está inmersa por ejemplo en la recopilación de datos, en la evaluación del riesgo y en los servicios de control.

A nivel general existen varios fenómenos o amenazas que son monitorizados a través de un SAT, entre las que se tiene: Inundaciones urbanas [9-10], terremotos costeros [24], escasez de agua en cuencas [25] erosión en montañas [26], seguridad en las minas [27], entre otros.

DISEÑO DE UNA WSN PARA LA MONITORIZACIÓN DEL ARROYO “LA BRIGADA”

Como escenario para el diseño de la WSN, se caracteriza una sección del recorrido del arroyo llamado comúnmente “La Brigada”. La WSN sería el componente tecnológico para la captura de información y posterior divulgación de los datos.

Luego de la caracterización se identificaron seis puntos donde el arroyo recibe afluentes y donde se ubicarán los nodos que vigilarán las condiciones ambientales para establecer un nivel de alerta.

En la Figura 2 tomada con la herramienta Google Earth (Map data©2014 Google ©Inc.), se muestra el recorrido a monitorear para este arroyo, identificándose los seis puntos de ubicación de los nodos.

Para analizar los detalles de la implementación de los nodos se procedió a realizar un estudio de sitio (*Site survey* en el argot técnico), el que incluyó el desarrollo de un formato que permitiera determinar características técnicas y de diseño previas a la implementación, en cuanto al sistema energético y eléctrico, sistema de RF, análisis de equipos y obra civil necesaria para la instalación de la WSN. Una imagen de este formato se muestra en la Figura 3.

A continuación se muestran los detalles del sistema energético para los nodos, quienes son descritos en la Tabla 1, después de realizar el estudio de sitio.

Una arquitectura típica de una WSN está conformada por un *cluster* o *Cluster Head Node* encargados de recoger la información de los sensores; en esta red cualquiera de los nodos podría funcionar como nodo

Tabla 1. Alternativas energéticas para la red.

	Baterías	Panel solar	Cableado
Tipo de alimentación	Sí	Sí	Sí
Voltaje de funcionamiento	3,3 V	3,3V-5V	3,3V-5V
Voltaje nominal de entrada	3,3V	3,3V	3,3V
Consumo en potencia	0,85W	1,25W	0,85W

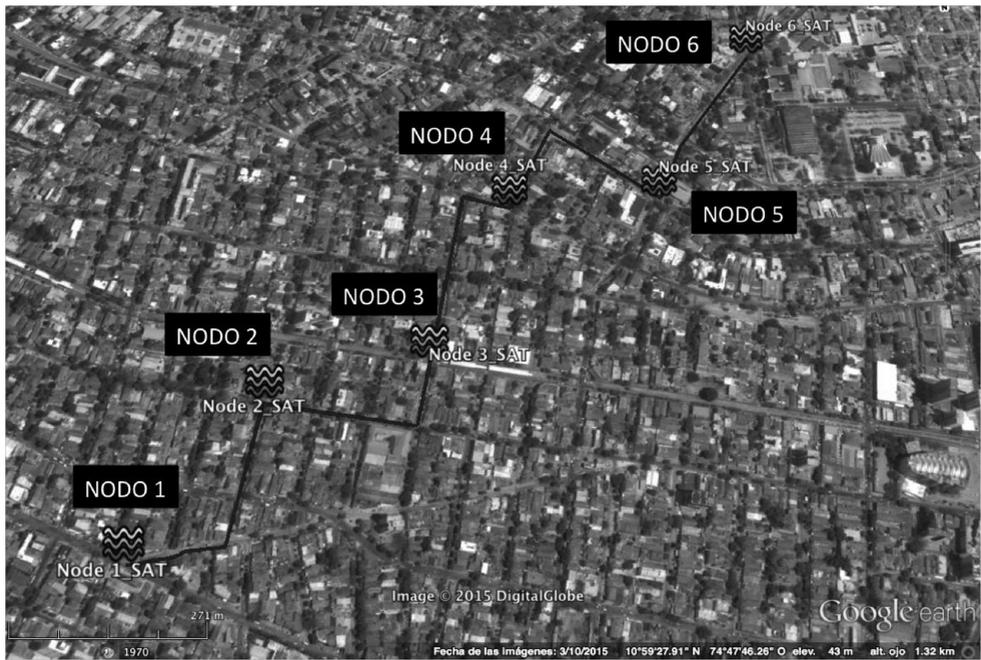


Figura 2. Mapa de recorrido del arroyo “La Brigada” con ubicación de nodos.

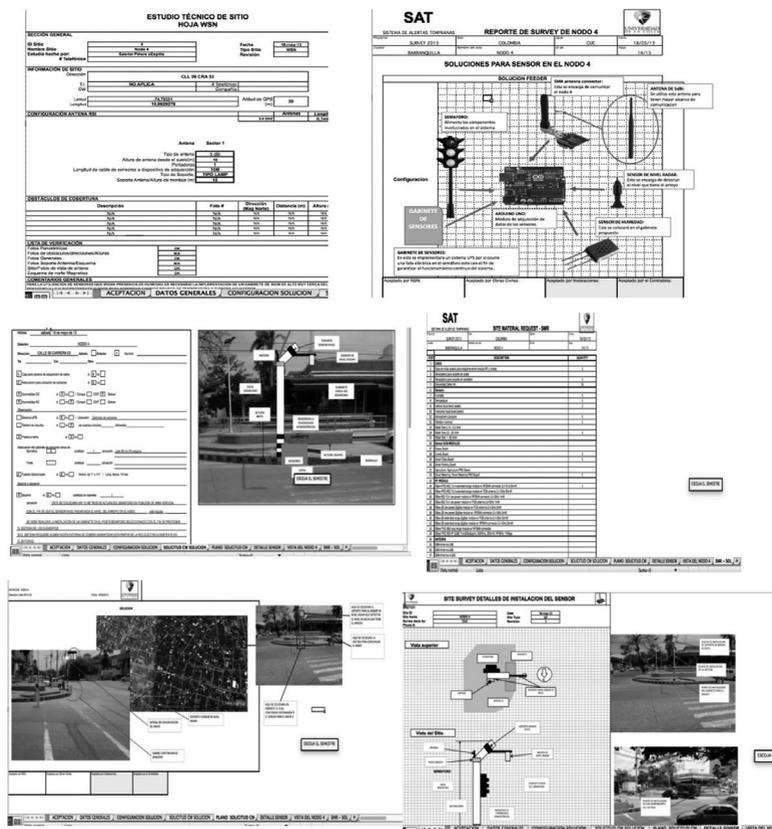


Figura 3. Formato para estudio de sitio de un nodo.

Gateway, siendo en este caso el nodo 6, debido a que está próximo a la Universidad de la Costa.

Tomando como referencia lo anterior, se diseña la arquitectura mostrada en la Figura 4 como la red de sensores inalámbricos para el monitoreo del arroyo, la que despliega seis nodos que se encargarán de vigilar las condiciones ambientales presentes en su recorrido. Se contará con cinco nodos que operarán como dispositivos finales que se comunicarán por medio de saltos (Red Ad-Hoc) con el Gateway en el nodo 6. Este último es el más completo de todos debido a que se encarga de controlar la red y regular los eventos y mensajes.

La información obtenida por los nodos se alojará en un servidor para que esta sea presentada en un entorno disponible mediante una conectividad a internet en equipos de cómputo, pantallas de monitoreo, tabletas y smartphones.

Para la captura de la información se hace uso de la plataforma Wasmote de Libelium, interactuando con el sensor de temperatura MCP700A, el sensor de humedad relativa 808H5V5, el de presión atmosférica MPX4115A y el instrumento WS-3000, quien posee un anemómetro, veleta para dirección del viento y

un pluviómetro para medir la intensidad de la lluvia. La Figura 5 muestra la información monitoreada del nodo 3 y el nodo 6, realizada durante 10 minutos.

Para la transmisión de los datos por medio de la red de sensores inalámbricos se seleccionó la tecnología Zigbee [15], mediante el módulo de radio XBee-PRO ZB (S2), porque en comparación con otros módulos, tiene un mayor alcance en su enlace de radio en un solo salto. Por ejemplo el chip de radio modelo CC2420 fabricado por la empresa Texas Instruments, y que son empleadas por las motas TelosB, pueden llegar hasta 250 m [28-29] mientras que las de XBee-PRO S1 hasta 1.6 km [30] y las XBee-PRO ZB (S2) a hasta 3.2 km [31]. Este aspecto es importante dado que se consideran las distancias existentes entre cada uno de los nodos, como se evidencia en la Figura 6.

Además en la Figura 4 se detalla la configuración de la red con un PAN ID: 123 a modo de pruebas de campo. El módulo de radio XBee-PRO ZB (S2) es un dispositivo para comunicación inalámbrica que utiliza los protocolos IEEE 802.15.4 y ZigBee para comunicarse con otros nodos sensores y con la estación base e implementa la siguiente lista de características [32-33].

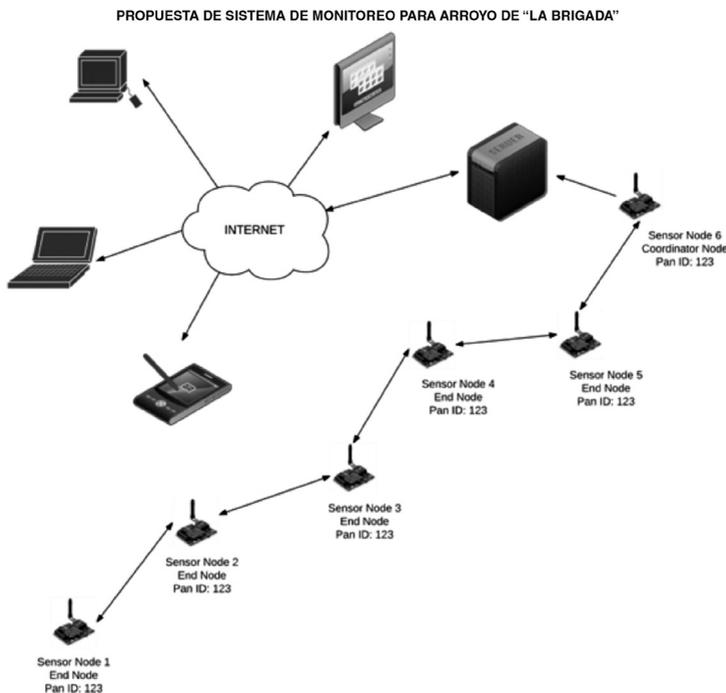


Figura 4. Arquitectura de la red para monitoreo de arroyo.



Figura 5. Toma de datos de sensores por donde pasa el arroyo: “La Brigada”.

- Acceso al medio: para que los nodos de la red no transmitan al mismo tiempo provocando colisiones de datos y errores en la comunicación.
- Direccionamiento: Para asegurar que solo el nodo deseado utilice los datos de recepción.
- Detección de errores: Validando los datos recibidos en el nodo correctamente.
- Reconocimientos y reintentos: Notificando al nodo de transmisión.

La Tabla 2 muestra los valores del dispositivo XBee-PRO ZB (S2) [34] que se está empleando para desarrollar los enlaces entre los nodos de mediciones establecidos dentro del área urbana de despliegue en la ciudad de Barranquilla.

Tabla 2. Valores del dispositivo XBee-PRO ZB (S2) [38].

Especificaciones de radio	Valores
Outdoor/RF rango línea de vista	Hasta 3,2 km
Potencia de TX	Hasta 17 dBm
Sensibilidad de recepción	-102 dBm
RF velocidad de datos	250 Kbps
Frecuencia de operación	2,4 GHz



Figura 6. Distancia entre nodos para el sistema de monitoreo en arroyo “La Brigada”.

Se ubicaron los puntos de los nodos 3 y 4, con las coordenadas geográficas recogidas desde un GPS, y cuya distancia coincide con la zona de paso de un arroyo de dimensiones importantes en la ciudad de Barranquilla. Se colocaron los valores de radio de la Tabla 2 en el software libre Radio Mobile [35] para estimar el presupuesto del enlace. Se consideró además que el enlace es simétrico, porque se usaron los mismos equipos para cada nodo con antenas omnidireccionales de 5 dBi y como indica la Figura 7 el margen del enlace en el lado del receptor es de 38,2 dB; y este al ser mayor a 10 dB demuestra la estabilidad y factibilidad del enlace para llevarlo a cabo sin ningún problema pues con este valor se alcanza un *throughput* de entre el 70 y 100% [36].

Además se realizó una prueba de campo al aire libre en una zona rural para contrastar los resultados obtenidos de forma real con la placa waspmote integrada con un módulo XBee-PRO ZB (S2), con los modelados por el software. Para este propósito se realizaron pruebas en el segmento de 1 km de una carretera de más de 15 km de largo, ubicada a las afueras de la ciudad (ver Figura 8).

En este caso la única obstrucción fue la vegetación a los lados de la carretera pero esta no interfirió con la línea de vista. La prueba se realizó a distancias de 100, 200, 300, 400 y 500 m. A cada nueva distancia se repitió la transmisión para medir los parámetros (RSSI, Perdida de paquetes y éxito de transmisión) nuevamente.

Descripción de las pruebas

En total se realizaron tres tipos de pruebas:

– Prueba en ambiente urbano con obstáculos

Se denominó prueba *Indoor*. Un nodo se ubicó en el laboratorio de comunicaciones de la universidad, y otro nodo remoto a distancias del primero de: 1, 10, 20, 30 y 40 m. En cada una de las nuevas distancias aparecieron obstrucciones en la línea de vista. En la medición de los 10 m existe la obstrucción de una pared de concreto de 18 cm espesor. A los 20 m se adiciona la obstrucción de una columna de concreto de 60 cm de espesor; a los 30 m se suma la obstrucción de personas en la plazoleta y a los 40 m de distancia se agrega a la obstrucción de la línea de vista un árbol cuyo tallo es de 100 cm de diámetro.

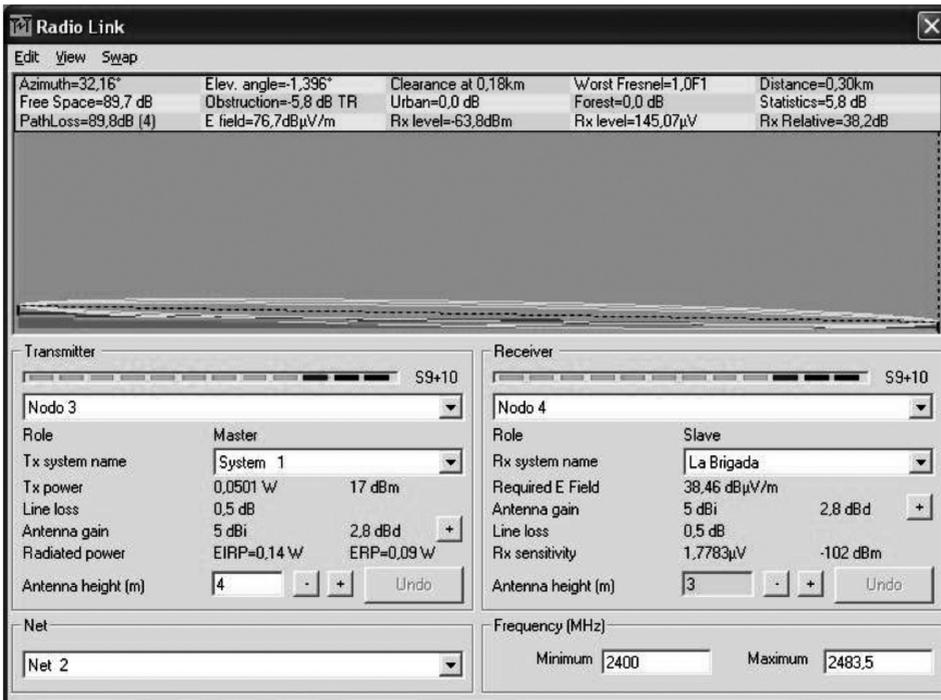


Figura 7. Perfil del enlace entre el nodo 3 y el nodo 4, distancia que recorre un arroyo importante en Barranquilla.

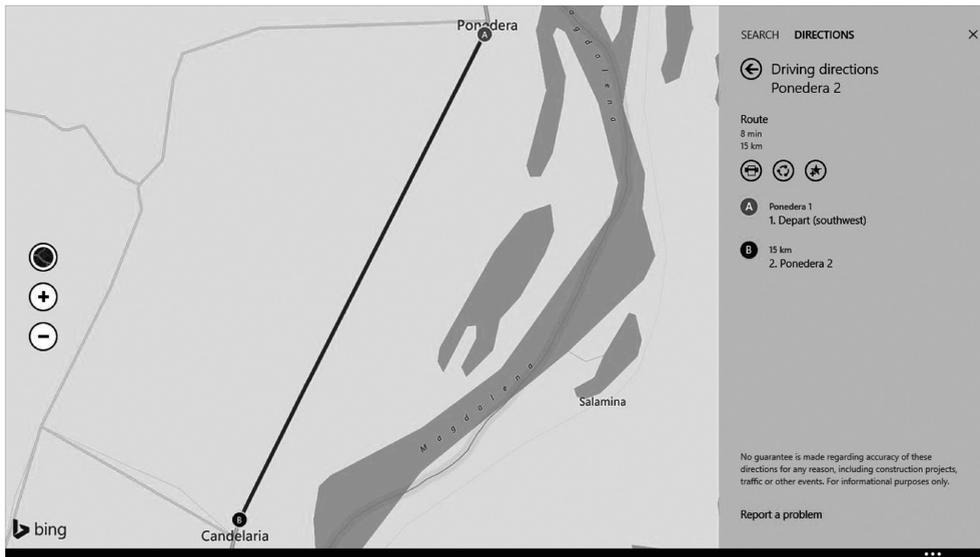


Figura 8. Ubicación en el mapa del lugar donde se realizó la prueba de campo. La posición de los dos puntos fue en las coordenadas 10.61481; -74.76868 y 10.61561; -74.76829 para el enlace de 400 m.

La prueba *Indoor/Urban* es realizada debido a que el centro de mando se ubicará dentro de una estructura lo que hace necesario mediciones con esas características.

– Prueba en ambiente libre de obstáculos y en área urbana

Se denominó prueba *Urban* y en todas las distancias hay línea de vista entre el host local y remoto. Se realizó en el parqueadero de la universidad donde hay edificios y automóviles a los lados de la vía. De manera similar a la prueba de interiores, esta se repitió a distancias de 1, 10, 20, 30, 40 y 50 m. Esto se hizo para simular los efectos de Shadowing sobre la transmisión inalámbrica.

– Prueba en ambiente libre de obstáculos y en área rural

Se denominó prueba *Rural*, hubo línea de vista entre el host local y el remoto. Se realizó en el segmento de 1 km de una carretera de más de 15 km de largo en tramo recto ubicada a las afueras de la ciudad (ver Figura 8). La vegetación a los lados de la carretera no interfirió con la línea de vista. La prueba se realizó a distancias de 100, 200, 300, 400, 500 y 800 m.

Para las tres pruebas se utilizó el software X-CTU [37] (Ver Figura 9) para medir los niveles de RSSI;

se enviaron 100 paquetes de datos desde el nodo coordinador conectado a un PC hasta un host remoto ubicado a diferentes distancias (entre 100 y 800 m). El host remoto recibía cada paquete y lo reenviaba al nodo local y en cada prueba se midieron los siguientes parámetros:

- **RSSI:** Indicador de intensidad de señal recibida (del inglés *Received Signal Strength Indicator*).
- **Pérdida de paquetes y errores de transmisión:** Son los paquetes que regresan desde el nodo remoto pero que no son recibidos en el nodo local, o que se envían desde el nodo local, pero no son recibidos por el nodo remoto.

El nodo coordinador se programó para que espere un segundo como máximo para recibir un paquete, pasado ese tiempo si no se recibía se enviaba el siguiente paquete y se contabilizaba un paquete perdido.

– **Éxito de la transmisión:** Son paquetes que se enviaron y fueron exitosamente recibidos por el host local.

En la Figura 9 se visualiza los valores de RSSI, la cantidad de paquetes enviados y recibidos, generados por el software X-CTU; en la Figura 9a para un salto de 40 m en interiores, 9b en 50 m

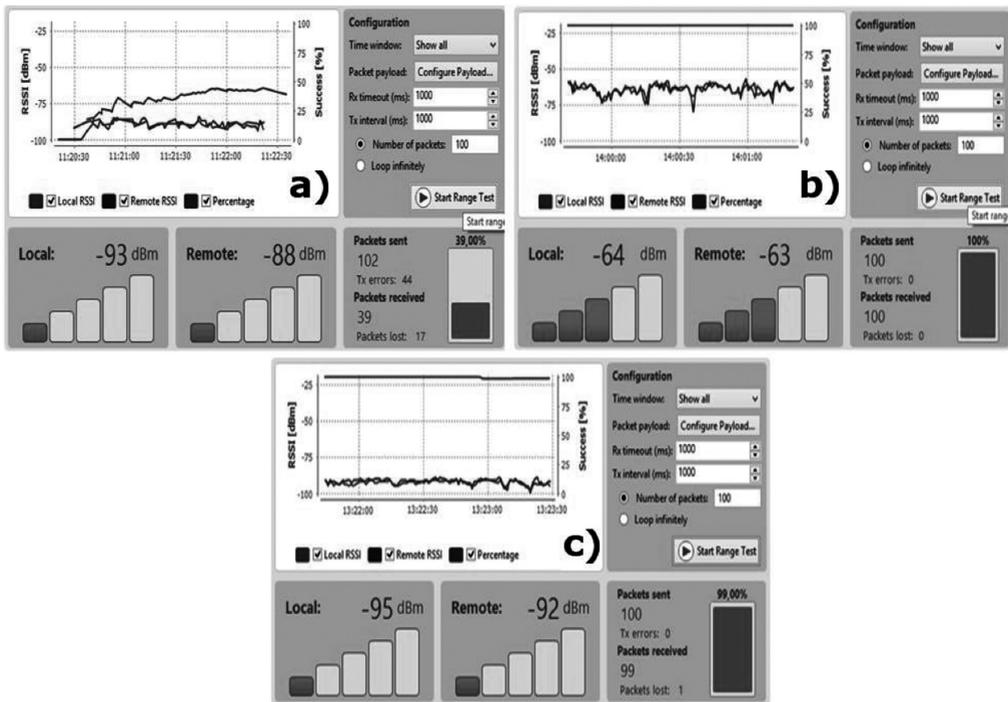


Figura 9. Gráficas generadas con el software X-CTU [37] pruebas en ambiente con obstáculos 10a, ambiente libre de obstáculos urbano 10b y ambiente libre de obstáculos Rural 10c.

en la prueba de exteriores urbana y 9c en la de 400 m en área rural.

La Figura 10 muestra la etapa de pruebas de las comunicaciones inalámbrica. En un extremo se instaló la estación meteorológica sobre un mástil

ubicado al final de la carretera que está conectada a la plataforma Wasp mote de Libelium cuyo módulo de radio es la XBee-PRO ZB (S2). En el otro extremo se tiene una portátil registrando los valores que provienen de la estación meteorológica, se emplea en este extremo un nodo con el mismo



Figura 10. Imágenes tomadas durante la prueba de campo. En la parte izquierda la estación meteorológica, a la derecha el nodo coordinador.

módulo de radio, además ambos nodos tienen antenas omnidireccionales de 5 dBi y cuentan con línea de vista despejada. La estación está conformada por tres sensores, humedad relativa, temperatura y presión atmosférica y una estación meteorológica secundaria que dispone de sensores de cantidad de agua (pluviómetro), de velocidad y dirección del viento (estación WS-3000) [38]

Como se aprecia en la Figura 11, se modeló el enlace inalámbrico de la prueba de campo usando las coordenadas de la Figura 8 y empleando los parámetros del equipo de radio XBee-PRO ZB (S2). Se consideró que es un enlace muy estable ya que el margen de recepción es de 34,6 dB, mayor a los 10 dB recomendados mínimamente por [36]. El enlace es de 400 m debido a que nuestra red piloto tiene distancias menores a este valor por cada salto.

Por el diseño de la red y los requisitos del sistema, se establece la diagramación de la arquitectura de red, la que incluye los sensores para la captura de datos y el sistema de transmisión [39]. Esto es complementado con la Figura 6, donde se muestran los principales elementos que conforman la solución del sistema de monitoreo a implementar.

Desarrollo de aplicación web móvil

El desarrollo de la aplicación web móvil está basada en la metodología OMT (*Object Modeling Technique*) [38], la cual es una técnica que facilita el desarrollo de software con la virtud de ser una metodología de carácter abierto y de dominio público. OMT está compuesta por cuatro fases consecutivas y evolutivas: análisis de objetos, diseño del sistema, diseño de objetos e implementación. En la Figura 12 se muestran las cuatro fases mencionadas para la

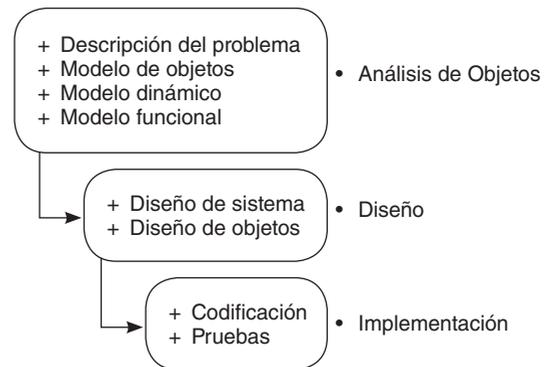


Figura 12. Metodología OMT para desarrollo de aplicación web móvil.

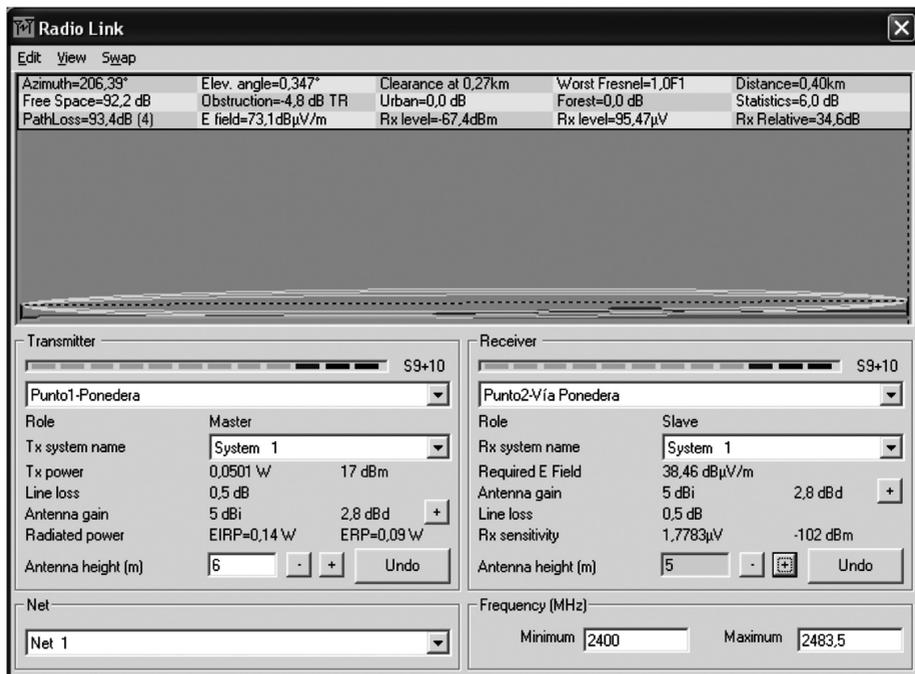


Figura 11. Perfil del enlace entre dos nodos ubicados en la carretera, usando para cada punto las coordenadas de la Figura 8.

integración de la aplicación web móvil en el diseño de la red de sensores inalámbricos.

El análisis de la aplicación web se realiza mediante el lenguaje unificado de modelado UML® por sus siglas en inglés *Unified Modeling Language*, este modelo dispone de diagramas que ayudan a comprender la complejidad del sistema [39-41], por lo tanto es importante la especificación de requisitos que permiten plasmar en el desarrollo de la aplicación web móvil las funcionalidades y requerimientos del sistema; UML define varios diagramas para representar los aspectos diferentes del desarrollo de una aplicación. En el desarrollo de este proyecto se escogieron algunos de estos tipos de diagramas como son el diagrama de clases (para dar la estructura lógica de objetos) y el diagrama de casos de usos (para dar síntesis en el requisito a desarrollar). En la Figura 13, se muestra la gráfica correspondiente al diagrama de casos de uso: gestionar sensor.

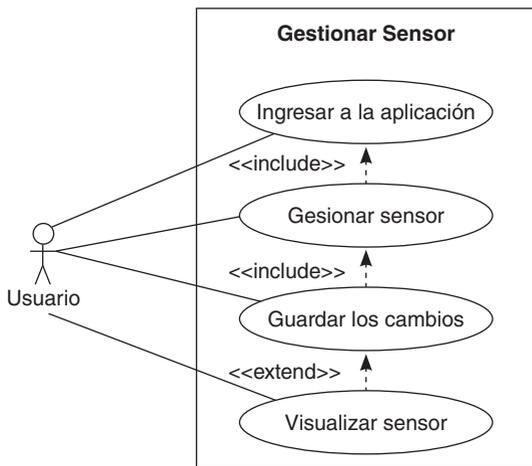


Figura 13. Gráfica de un diagrama de casos de uso: gestionar sensor.

Nuestro diagrama UML® contiene la siguiente estructura. Visualizar sensor -> Guardar los cambios -> Gestionar sensor -> Ingresar a la aplicación.

En el proceso de diseño se extiende, refina y reorganiza todos los puntos observados en el proceso de modelado conceptual con el objetivo de generar una especificación lo más estructurada posible del sistema a desarrollar.

Arquitectura de la solución: Para el desarrollo de esta aplicación web móvil se utiliza el lenguaje de programación Ruby, framework de aplicaciones web Ruby on Rails orientado a objetos y patrón de diseño usado MVC.

En la Figura 14 se muestra el diseño de la arquitectura, con el flujo del requisito en la fase de implementación de los sensores en los puntos críticos de la ciudad; el aplicativo le da la opción al usuario de gestionar los sensores en la aplicación. Con la tecnología implementada la aplicación tendrá el rendimiento y escalabilidad para soportar la tecnología SOAP para recibir información al servidor de datos por mensajería SOAP.

En la fase de implementación una vez recopilada la información y después de haber hecho el análisis de los requisitos se desarrolla la identificación de los sensores, creación, modificación y eliminación de los mismos en el ámbito de la aplicación, posteriormente son implementados de manera estratégica para que brinden información relevante de los arroyos más peligrosos de la ciudad de Barranquilla.

La Figura 15 muestra la aplicación web donde se puede observar un tramo del arroyo con una alerta de nivel medio. Opera en conjunto con el sistema de monitoreo para el arroyo de "La Brigada"



Figura 14. Arquitectura de la solución.

conformado por la WSN. Se prevé que dicha aplicación será integrada a un Sistema de Alertas Tempranas que informe de manera oportuna a la comunidad cuando un arroyo se pueda originar o cuando este sea peligroso.

RESULTADOS

Los datos monitoreados por los sensores de la estación piloto mostraron las variaciones ambientales en los

puntos donde se realizaron pruebas; sin embargo, se simuló el uso del pluviómetro. A continuación se muestran estas variaciones en dos nodos, donde se tomó una muestra durante 10 minutos (4:19 pm – 4:29 pm en el nodo 3 y 4:43 pm – 4:53 pm en el nodo 6) que arrojó una serie de 22 mediciones, las que son mostradas en la Figura 16 y la Figura 17.

Para analizar el rendimiento del dispositivo que se empleará en el sistema de monitoreo a diseñar



Figura 15. Aplicación web para el sistema de monitoreo.

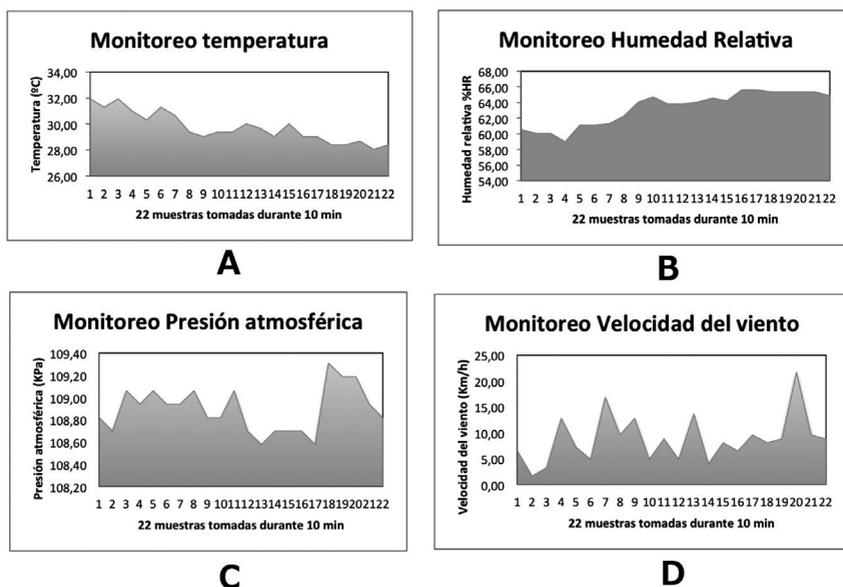
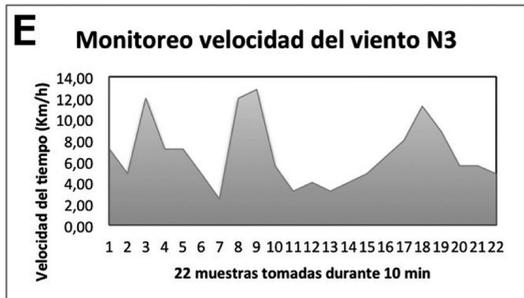
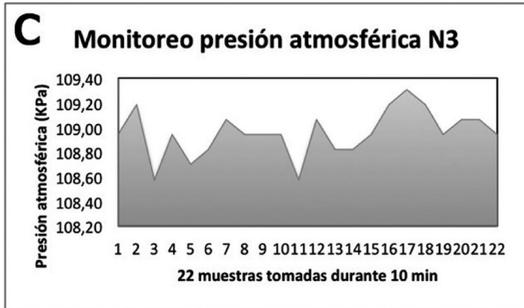
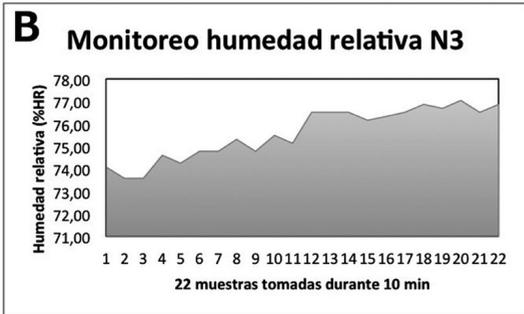
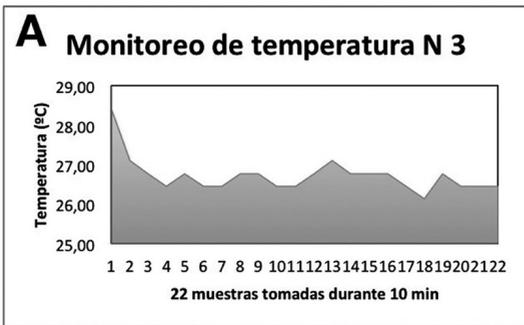


Figura 16. Variación ambiental registrada en el nodo 6.



se han realizado pruebas de campo para evaluar el alcance de la señal de la WSN en un solo salto de la red. Los datos obtenidos en cada una de estas se detallan en las tablas y figuras a continuación.

Tabla 3. Niveles de RSSI para las pruebas Indoor y Urban del módulo XBee-PRO ZB (S2).

Pruebas niveles RSSI Indoor/Urban					
Distancia (m)	1	10	20	30	40
Indoor RSSI (-dBm)	39	77	83	91	88
Urban RSSI (-dBm)	39	48	57	53	60

Tabla 4. Niveles de RSSI para las pruebas rurales del módulo XBee-PRO ZB (S2).

Pruebas niveles RSSI Rural					
Distancia (m)	10	200	300	400	500
Rural RSSI (-dBm)	64	73	88	92	98

Tabla 5. Margen de Recepción para la prueba rural del módulo XBee-PRO ZB (S2).

Pruebas niveles Rx Relative Indoor/Urban						
Distancia (m)	1	10	20	30	40	50
Indoor Rx Relative (dB)	63	25	19	11	14	
Urban Rx Relative (dB)	63	54	45	49	42	39

Tabla 6. Margen de Recepción para la prueba rural del módulo XBee-PRO ZB (S2).

Pruebas niveles Rx R Rural					
Relative	10	200	300	400	500
Rural Rx Relative (dB)	38	29	14	10	4

Las Tablas 3 con 5 y 4 con 6 corresponden a los indicadores de intensidad de la señal recibida (RSSI) y al margen de recepción de la señal respectivamente para los tres tipos de pruebas. Dichos indicadores están relacionados, ya que el margen de recepción es la sustracción del RSSI con la sensibilidad de recepción (en el caso del XBee-PRO ZB (S2) igual a -102 dBm). Por lo tanto, también los diagramas de barra de la Figura 18 y la Figura 19 están relacionados con las tablas mencionadas ya que son generadas a partir de ellas.

Figura 17. Variación ambiental registrada en el nodo 3.

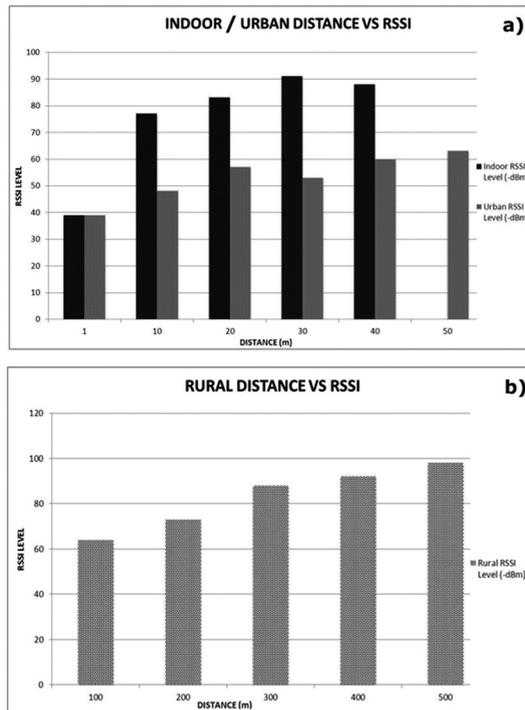


Figura 18. Niveles de RSSI para el módulo XBee-PRO ZB (S2). 15a comparación de pruebas en ambiente Indoor y urbano. 15b pruebas en ambiente rural.

Como es de esperar el RSSI en ambiente *indoor* tiene menor valor para las mismas distancias que en un ambiente urbano (ver Tabla 3) debido a los obstáculos que hay en medio de la comunicación, por lo que a 50 m la comunicación se pierde para el enlace *indoor*, mientras que a esta distancia sí hay comunicación en el enlace de ambiente urbano con un RSSI de -60 dBm como lo indica la Figura 18a.

Por otra parte, las pruebas en ambiente rural denotan mayor alcance por ser un ambiente al aire libre, con menos obstáculos significativos en la comunicación. Aquí conforme a los valores de la Tabla 4 y su diagrama de barras de la Figura 18b se nota que la disminución del RSSI es directamente proporcional al aumento de la distancia entre los dos nodos, llegando a tener en 500 m el RSSI de -98 dBm, cercano al umbral de sensibilidad de recepción del módulo de radio.

Se dijo en párrafos anteriores que estudios previos como el [40] y resultados basados en la experiencia,

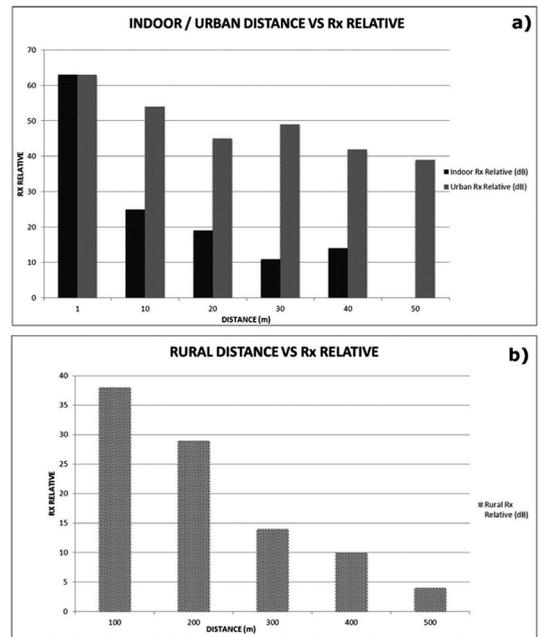


Figura 19. Niveles de RSSI para el módulo XBee-PRO ZB (S2). 16a comparación de pruebas en ambiente Indoor y urbano. 16b pruebas en ambiente rural.

establecen que el margen de recepción (Rx Relative) debe ser al menos 10 dB para que se pueda asegurar un enlace estable. Por ello, podemos asegurar que habrá comunicación estable en ambientes “indoor” hasta los 40 m ya que aquí este valor es de 14 dB conforme a la Tabla 5 y Figura 19a; y para ambiente “urban” la distancia puede ser mayor, ya que a 50 m se tiene un margen de recepción de 39 dB lo que asegura la calidad del enlace.

En el caso del margen de recepción en ambiente rural, las pruebas realizadas evidencian que en el enlace inalámbrico de 400 m da un margen de recepción de 10 dB, valor que indica es suficiente para afirmar la estabilidad del enlace [40]. Cabe resaltar que en el perfil del radio enlace modelado con el software libre Radio Mobile, el valor del margen es superior (34,6 dB), dado que se consideran la posición de las antenas a alturas de 6 y 5 m del suelo (Figura 11) y en las pruebas de campo efectuadas al lado de la carretera se ubicaron las antenas a alturas menores a los 2 m porque no se contaban con mástiles portables de mayor envergadura (de difícil adquisición en el mercado).

Para las pruebas de paquetes perdidos se tomó la información proporcionada por la herramienta X-CTU mostrada en la Tablas 7 y 8 y la Figura 20.

Tabla 7. Porcentaje de paquetes perdidos ambientes Indoor y Urbano para módulo XBee-PRO ZB (S2).

Pruebas paquetes perdidos Indoor/Urban						
Distancia (m)	1	10	20	30	40	50
% Packet Loss Indoor	0	2	35,29	48,51	61	
% Packet Loss Urban	0	0	0	0	1	0

Tabla 8. Porcentaje de paquetes perdidos en ambiente Rural para módulo XBee-PRO ZB (S2).

Pruebas paquetes perdidos Rural					
Distancia (m)	100	200	300	400	500
% Packet Loss Rural	0	1	9	1	7

La Tabla 7 y Figura 20b evidencian que el desenvolvimiento del módulo en ambientes “indoor” no es óptimo, debido a que en pruebas superiores a 10 m el módulo XBee-PRO ZB (S2) registró pérdidas de paquetes cercano al 50% en un enlace de 30 m y del 61% en 40 m (Tabla 7 y Figura 20b). Sin embargo, al realizar estas pruebas en espacios libres el rendimiento fue muy bueno a cortas distancias sin tener que buscar línea de vista, y es similar al presentado en su hoja técnica.

Aumentando la distancia para las pruebas en exteriores y teniendo asegurada la línea de vista despejada, los valores fueron buenos ya que los máximos valores en pérdidas de paquetes fueron del 1% en ambiente urbano e inferior al 10% en ambiente rural (ver Tabla 8 y Figura 20c). Esto demuestra que el módulo seleccionado ofrecerá un desempeño bueno y estable en la transmisión de información de los nodos que estarán monitoreando el arroyo “La Brigada” porque la máxima distancia a cubrir en un salto es inferior a 400 m.

CONCLUSIONES

Nuestro diseño actual de la red para detectar y alertar la formación de un arroyo es alentador, principalmente por los resultados positivos obtenidos en las pruebas

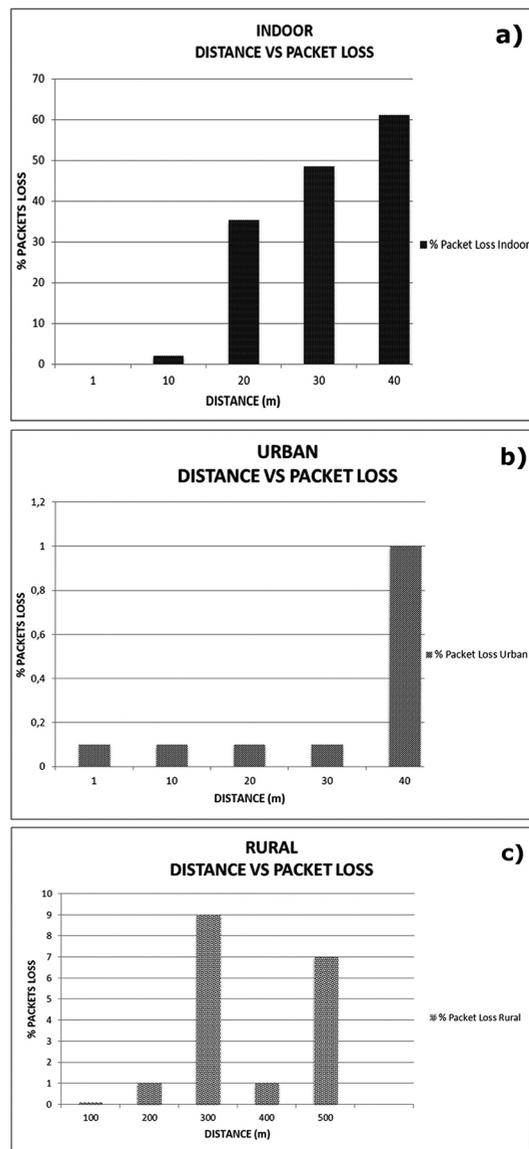


Figura 20. Porcentaje de paquetes perdidos módulo XBee-PRO ZB (S2). a) Prueba en ambiente Indoor. b) Prueba en ambiente urbano. c) Prueba en ambiente rural.

de campo correspondientes a la adquisición y transporte de los datos obtenidos al monitorear las condiciones ambientales y que aseguran desde el punto de vista técnico la viabilidad del despliegue. En ese sentido en el presente artículo se ha trabajado en las dos primeras fases de un futuro Sistema de Alerta Tempranas (SAT), fase conocimiento del riesgo, y de la difusión y comunicación. Con el

fin de contribuir a reducir al mínimo los impactos producidos por el fenómeno de los “arroyos” que afecta a la ciudad de Barranquilla.

En una etapa posterior, nuestro diseño se articulará con otro grupo de sensores que permitirá dar a conocer la peligrosidad del arroyo por medio de la medición de la fuerza de empuje del caudal y de su nivel.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de este proyecto por parte del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Colombia (Colciencias), mediante el contrato N° 0426-2013.

REFERENCIAS

- [1] M. Youssef and N. El-Sheimy. “Wireless Sensor Network: Research vs. Reality Design and Deployment Issues”. Fifth Annual Conference on Communication Networks and Services Research - CNSR07, pp. 8-9. 2007. ISBN: 0-7695-2835-X. DOI: 10.1109/CNSR.2007.71.
- [2] C. Alcaraz, C. Fernandez-Gago and J. Lopez. “An Early Warning System Based on Reputation for Energy Control Systems”. IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 2 N° 4, pp. 827-834. 2011. ISSN: 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2011.2161498.
- [3] The United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Global-Survey-of-Early-Warning-Systems. Day of visit: May 25, 2015. URL: <http://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/Global-Survey-of-Early-Warning-Systems.pdf>
- [4] Z. Medina-Cetina and F. Nadim. “Stochastic design of an early warning system”. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. Vol. 2 N° 4, pp. 223-236. 2008. ISSN: 1749-9526. DOI: 10.1080/17499510802086777.
- [5] E. Murcia-Melo. “Sistemas de Alertas Tempranas, Control de Accidentalidad generada por arroyos”. Corporación Universidad de la Costa. Editorial Educosta, pp. 51-63. Barranquilla, Colombia. ISBN: 978-958-8710-42-6. 2010.
- [6] University Corporation for Atmospheric Research under Award NA06NWS4670013 from the National Oceanic and Atmospheric Administration. “Flash flood early warning system reference guide”. U.S. Department of Commerce, pp. 2.1-2.2. ISBN: 978-0-615-37421-5. 2010.
- [7] H. Kaschel y J. Pérez, J. “Monitoreo ubicuo de salud en tiempo real con WBSN”. Ingeniare. Vol. 2 N° 22, pp. 169-176. 2014. ISSN: 0718-3305. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052014000200003>.
- [8] C.H. Villarroel G. and M.J. Villarroel F. “Wireless smart environment in Ambient Assisted Living for people that suffer from cognitive disabilities”. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. Vol. 22 N° 2, pp. 158-168. 2014. ISSN: 0718-3305. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052014000200002>.
- [9] B. Balis, M. Kasztelnik, M. Bubak, T. Bartynski, T. Gubala, P. Nowakowski and J. Broekhuijsen. “The UrbanFlood Common Information Space for Early Warning Systems”. Procedia Computer Science - International Conference on Computational Science. ICCS. Vol. 4, pp. 96-105, 2011. ISSN 1877-0509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2011.04.011>.
- [10] V.V. Krzhizhanovskaya, G.S. Shirshov, N.B. Melnikova, R.G. Belleman, F.I. Rusadi, B.J. Broekhuijsen and R.J. Meijer. “Flood early warning system: design, implementation and computational modules”. Procedia Computer Science - International Conference on Computational Science, ICCS. Vol. 4, pp. 106-115. 2011. ISSN: 1877-0509. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2011.04.012>
- [11] M. Deng and Q. Chen. “Coal and Gas Outburst Monitoring System Based on WSN”. Procedia Engineering - Symposium on Security Detection and Information Processing. Vol. 7, pp. 387-391 code 83467. 2010. ISSN: 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.11.063.
- [12] F.G. Montoya, J. Gomez, F. Manzano-Agugliaro, A. Cama, A. García-Cruz and J.L. De La Cruz. “6LoWSof: A software suite for the design of outdoor environmental measurements”. Journal of Food, Agriculture and Environment. Vol. 11 N° 3-4, pp. 2584-2586. 2013. ISSN: 14590255.

- [13] J.G. Caicedo, M.A. Acosta y A. Cama-Pinto “Modelo de despliegue de una WSN para la medición de las variables que causan fuertes precipitaciones”. *Prospectiva*. In Press. 2015. ISSN: 1692-8261.
- [14] A. Cama, E. De la Hoz y D. Cama. “Las redes de sensores inalámbricos y el internet de las cosas”. Vol. 8 N° 1, pp. 163-172. 2012. ISSN 0122-6516.
- [15] G. Piñeres y A. Mejía. “Plataformas tecnológicas aplicadas al monitoreo climático”. *Prospectiva*. Vol. 11 N° 2, pp. 78-87. Diciembre 2013. ISSN: 1692-8261. DOI: 10.15665/rp.v11i2.42
- [16] The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). “Developing Early Warning Systems: A Checklist”. Date of visit: May 25, 2015. URL: http://www.unisdr.org/files/608_10340.pdf
- [17] United Nations Environment Programme (UNEP). “Early Warning Systems: State of the Art and Future Directions”. Division of Early Warning and Assessment (DEWA), pp. 1-3. Nairobi, Kenya. ISBN: 978-92-807-3263-4. 2012.
- [18] M. Castillo-Effer, D.H. Quintela, W. Moreno, R. Jordan and W. Westhoff. “Wireless sensor networks for flash-flood alerting”. *Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*. Vol. 1, pp. 142-146. 2004. ISBN: 0-7803-8777-5. DOI: 10.1109/ICCDSCS.2004.1393370
- [19] G. Furquim, F. Neto, G. Pessin, J. Ueyama, J. P. De-Albuquerque, M. Clara, E. M. Mendiondo, V. C. B. De-Souza, P. De-Souza, D. Dimitrova and T. Braun. “Combining Wireless Sensor Networks and Machine Learning for Flash Flood Nowcasting”. 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA). Vol. 1, pp. 67-72. 2014. ISBN: 978-1-14799-2652-7. DOI: 10.1109/WAINA.2014.21
- [20] P. Wightman, A. De la Hoz and F. Mendoza. “Routing Analysis on Presence of Flash Floods in the City of Barranquilla”. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. Vol. 82 N° 2, pp. 283-290. 2015. ISSN: 1992-8645
- [21] K.K. Khedo. “Real-Time Flood Monitoring Using Wireless Sensor Networks”. *The Journal of the Institution of Engineers Mauritius - IEM Journal*. Vol. 1, pp. 59-69. 2013. URL: <http://www.iemauritius.com/news.php?readmore=67>
- [22] M.A. Islam, T. Islam, M. Ahmed and N. Ahmed. “Implementation of flash flood monitoring system based on wireless sensor network in Bangladesh”. *International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*. Vol. 1, pp. 1-6. 2014. ISBN: 978-1-4799-5179-6. DOI: 10.1109/ICIEV.2014.6850752
- [23] The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). “Platform for the Promotion of Early Warning”. Date of visit: May 25, 2015. URL: <http://www.unisdr.org/2006/ppew/whats-ew/basics-ew.htm>
- [24] G. Cervone, M. Kafatos, D. Napoletani, and R. Singh. “An Early Warning System for Coastal Earthquakes”. *Advances in Space Research*. Vol 37 N° 4, pp. 636-642. 2006. ISSN: 0273-1177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.071>.
- [25] Y.Y. Tan and X. Wang. “An Early Warning System of Water Shortage in Basins Based on SD Model”. *Procedia Environmental Sciences - International Society for Environmental Information Sciences 2010 Annual Conference (ISEIS)*. Vol. 2, pp. 399-406. 2010. ISSN: 1878-0296. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.044>
- [26] F. Hj and T. Kia Hui. “A Near Real-Time Early Warning System on Erosion Hazards”. *American Journal of Environmental Sciences*. Vol. 2, Issue 4, 146-153. 2006. ISSN: 1558-3910. DOI: 10.3844/ajessp.2006.146.153.
- [27] N. Miaomiao, Z. Shunbing, D. Chunquan, Y. Nianliang and X. Wei. “Study and application of typical disaster monitoring and early warning system in metal mine”. *Procedia Engineering - International Symposium on Safety Science and Technology*. Vol. 45, pp. 125-130. 2012. ISSN: 1877-7058. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.132>
- [28] M. Afanasyev, D. O’Rourke, B. Kusy, W. Hu. “Heterogeneous traffic performance comparison for 6LoWPAN enabled low-power transceivers”. *Proceedings of the 6th Workshop on Hot Topics in Embedded Networked Sensors, HotEmNets*. Artículo

- Nº 10. 2010. ISBN: 978-145030265-4. DOI: 10.1145/1978642.1978655.
- [29] A. Cama, F.G. Montoya, J. Gómez, J.L. De La Cruz and F. Manzano-Agugliaro. "Integration of communication technologies in sensor networks to monitor the Amazon environment". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 59 Nº 15, pp. 32-42. ISSN: 09596526. 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.06.041.
- [30] N. Petroulakis, E.Z. Tragos and I.G. Askoxylakis. "An experimental investigation on energy consumption for secure life-logging in smart environments". *IEEE 17th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks, CAMAD 2012*. Artículo Nº 6335353, pp. 292-296. 2012. ISBN: 978-146733125-8. DOI:10.1109/CAMAD.2012.6335353.
- [31] X. Liu, H. Chen, M. Wang and S. Chen. "An XBee-Pro based energy monitoring system". *Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference*. Artículo Nº 6398052. 2012. ISBN: 978-146734409-8. DOI: 10.1109/ATNAC.2012.6398052.
- [32] R.Hussin, R.C. Ismail, E. Murralli and A. Kamarudin. "Wireless Traffic Light Controller for Emergency Vehicle through XBee and Basic Stamp Microcontroller". *Procedia Engineering*. Vol. 41, pp. 636-642. 2012. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.223.
- [33] T.P. Lambrou and C.G. Panayiotou. "A testbed for coverage control using mixed wireless sensor networks". *Journal of Network and Computer Applications*. Vol. 35 Nº 2, pp. 527-537. 2012. ISSN: 10848045. DOI: 10.1016/j.jnca.2011.05.010.
- [34] Digi (2015). Digi - XBee-PRO ZB (S2). Date of visit. May 25, 2015. URL: <http://www.digi.com/>
- [35] Radio Mobile. 2015. Date of visit. May 25, 2015. URL: <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>
- [36] M. Zennaro, A. Bagula, D. Gascon, A.B. Noveleta. "Long distance wireless sensor networks: simulation vs reality". In *Proceedings of the 4th ACM Workshop on Networked Systems for Developing Regions*. Artículo Nº 12. 2010. ISBN: 978-145030193-0. DOI: 10.1145/1836001.1836013.
- [37] M.F. Fuzi, A.F. Ibrahim, M.H. Ismail and N.S. Halim. "HOME FADS: A dedicated fire alert detection system using ZigBee wireless network". *5th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*. Artículo Nº 6908695, pp. 53-58. 2014. ISBN: 978-147995692-0. DOI: 10.1109/ICSGRC.2014.6908695
- [38] Libelium. 2015. *Agriculture 2.0. Technical Guide*. Date of visit: May 25, 2015. URL: http://www.libelium.com/downloads/documentation/agriculture_sensor_board_2.0.pdf
- [39] M. Acosta. "Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T) para la Reducción del Riesgo de Inundaciones Súbitas y Fenómenos Atmosféricos en el Área Metropolitana de Barranquilla". *Scientia et Technica*. Vol. 18 Nº 2, pp. 303-308. Agosto de 2013. ISSN: 0122-1701.
- [40] J. Rumbaugh, I. Jacobson y G. Booch. "El Lenguaje Unificado de Modelado". *Manual de Referencia*. Pearson Addison-Wesley 2ª ed. S.A. Madrid, España 2007. ISBN: 978-84-7829-087-1.
- [41] A. Vicente, V. Santander, J. Castro, I. Freitas and F. Reyes. "JGOOSE: A Requirements Engineering tool to integrate I* organizational modeling with Use Case in UML". *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. Vol. 17 Nº 1, pp. 6-20. 2009. ISSN: 07183291. DOI: 10.4067/S0718-33052009000100002.