

RED DE SENSORES DE LARGA DISTANCIA USANDO ZIGBEE PARA EL MONITOREO Y LA GESTIÓN DEL RIESGO EN EL DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO-COLOMBIA

LONG-DISTANCE SENSOR NETWORK BASED ON ZIGBEE FOR MONITORING AND RISK MANAGEMENT IN QUINDÍO-COLOMBIA AREA

Julián Adolfo Ramírez¹, Jaime Alberto Buitrago², Jorge Iván Marín³

¹ M.Sc. Teoría de Señales

² M.Sc. Ingeniería Electrónica

³ Ph.D. Ingeniería Eléctrica y Computación

Recibido: 12 de febrero de 2014

Aceptado: 15 de marzo de 2014

Programa de Ingeniería Electrónica Universidad del Quindío Cra. 15 Calle 12N

emails: jaramirez@uniquindio.edu.co, jalbertob@uniquindio.edu.co, jorgemarin@uniquindio.edu.co

RESUMEN:

Por su posición geográfica y alta densidad demográfica, el departamento del Quindío es muy sensible a riesgos de amenaza por terremotos y deslizamientos, estos últimos generados por la acumulación de agua debida a las fuertes lluvias y desencadenados por efectos sismológicos. Existen estudios que muestran la alta vulnerabilidad por riesgos de deslizamiento en el departamento, y a pesar de la existencia de políticas gubernamentales para la gestión del riesgo, no existen en el departamento redes de monitoreo confiables y en tiempo real para estos sitios. En este trabajo se presenta el diseño de una red de sensores de bajo costo para el monitoreo de variables hidroclimáticas basado en tecnología ZigBee, haciendo énfasis en las consideraciones de diseño de los nodos, las políticas de comunicación, y estrategias adoptadas para permitir la comunicación a distancias de hasta 8 km. El diseño ha sido validado con medidas de campo, mostrando la factibilidad de comunicación por medio de ZigBee a largas distancias.

PALABRAS CLAVE: Gestión de Riesgo, Redes de Sensores, ZigBee, Variables Hidroclimáticas, Sistemas de Alerta Temprana

ABSTRACT:

The department of Quindio is a high-population area in Colombia, which is threatened by earthquakes and landslides. These landslides are a result of water accumulation due to heavy rains and triggered by seismic effects. Although geological and hydrological studies show high risk of landslides in this area, and despite the existence of government policies for risk management, there are no real-time networks for monitoring and firing early-warning alarms. In this paper, we present the design of a low-cost wireless sensor network for monitoring hydro-climatological variables based on ZigBee technology. We emphasize on the design considerations of the sensor nodes, communication policies and strategies adopted to allow communication for distances up to 8 km. Our design is validated by field measurements, which show the feasibility of using ZigBee communication over long distances.

KEYWORDS: Risk management, Wireless Sensor Networks, ZigBee, Hydro-climatological variables, Early-Warning Systems

1. INTRODUCCIÓN

En la historia reciente de Colombia son notables las catástrofes naturales producidas por diferentes agentes como terremotos, inundaciones, deslizamientos, e incendios forestales, entre otros (1). Lo anterior sumado al hecho de que la población del país ha aumentado significativamente en los últimos años en centros urbanos ubicados en zonas de alto riesgo, ha promovido la definición de políticas gubernamentales para la gestión de riesgo de desastres. En particular, el gobierno nacional a través del decreto 4147 de 2011 establece la conformación de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (SIGRD) entre cuyas funciones se encuentran la articulación de los sistemas nacionales de planeación, administración ambiental, ciencia, tecnología e innovación, y bomberos. De esta forma, el SIGRD plantea como necesidades a corto plazo el contar con herramientas ágiles y dinámicas para la toma de decisiones y planificación del riesgo.

Estudios realizados en Colombia respecto a la amenaza por riesgo de deslizamiento de taludes indica que el 96% de los incidentes son detonados por causas meteorológicas, donde el 56% son consecuencia de lluvias prolongadas, el 37% debido a las lluvias intensas de corta duración y el porcentaje restante a huracanes y otros eventos (2). Asimismo, estudios realizados por el IDEAM sobre los fenómenos del niño y la niña (3), ratifican la estrecha relación entre los eventos de deslizamientos y la intensidad de las lluvias. Lo anterior demuestra que un sistema de alerta temprana por riesgo de deslizamiento para en el país debe contar con un monitoreo continuo de

variables meteorológicas.

A nivel regional, en el departamento del Quindío, se han presentado diferentes catástrofes naturales como son el terremoto del 25 de enero de 1999 y múltiples deslizamientos de taludes inducidos por fuertes lluvias y posiblemente disparados por la alta sismicidad de la región. Los más notables de estos deslizamientos han sido los presentados en diciembre de 1999 en las estribaciones de la quebrada El Cofre en el municipio de Calarcá, Quindío. Este panorama de posibles catástrofes hace indispensable que en el departamento se cuente con un sistema integrado de monitoreo de riesgo conforme lo dicta el SIGRD. Si bien, en el departamento se cuenta desde 1999 con un sistema de monitoreo continuo de la sismicidad de la región a través del Observatorio Sismológico del Quindío (OSQ), con respecto al monitoreo de las zonas de riesgo por deslizamiento, el departamento no cuenta con un sistema que permita recolectar información continua y oportuna para la toma de decisiones en materia de gestión del riesgo, pues gran parte de la información climatológica es recolectada manualmente, y la información disponible en tiempo real está referenciada a zonas de bajo riesgo de deslizamiento. Es por esta razón que en el departamento del Quindío se hace necesario monitorear continuamente diferentes cuencas que desencadenarían en riesgos de deslizamiento. Para citar un ejemplo, está la cuenca de la quebrada el Cofre, que es una región activa de deslizamientos que requiere de monitoreo constante, pues de acuerdo a los estudios presentados en (4,5) se establece que esta región ha venido acumulando una cantidad de masa producto de deslizamientos anteriores los cuales en algún momento desencadenarán un evento de mayor

magnitud propiciado por factores desencadenantes como la precipitación y la actividad sísmica (4). De esta forma, enmarcado dentro de las políticas de gestión de riesgo, este trabajo describe la estructura física de la red de monitoreo en tiempo real de variables hidro-meteorológicas para el departamento del Quindío haciendo uso de una red de sensores basada en una red heterogénea ZigBee. En particular se describen en este trabajo, el diseño de los nodos terminales (motas), el diseño de la red inalámbrica, y sistema de información para el monitoreo de la red sensorial.

2. REDES DE MONITOREO PARA EL DESLIZAMIENTO

A nivel mundial, existen diferentes propuestas de sistemas de monitoreo en tiempo real para deslizamientos (6-12), sin embargo, no existe un consenso en cuanto a las variables físicas a monitorear para la generación temprana de alarmas. Algunos autores reconocen que se hace necesario monitorear exclusivamente los desplazamientos del talud (10,13) y otros argumentan que existe una alta correlación entre el nivel de precipitación y el riesgo de deslizamiento (11) (14), por lo que sugieren que el monitoreo de variables climatológicas es la mejor opción.

Entre los sistemas que emplean sensores de desplazamiento se encuentran propuestas con: Extensómetros para monitorear taludes de zonas rocosas (10), acelerómetros (11) y galgas extensiométricas (6).

Con respecto a los sistemas que monitorean variables climatológicas, se reconoce que la relación entre el nivel de lluvia y el riesgo de deslizamiento obedecen a características geológicas particulares del terreno, por lo cual es necesario contar con un estudio geológico previo y el cruce de información con otras variables tales como aceleración (11) o sismicidad (12).

Existen propuestas de sistemas de monitoreo muy complejos y robustos en los cuales cada nodo de la red de sensores incluye una columna de sensores que se cavan en el sitio de riesgo (12, 15). Esta columna incluye diferentes sensores como son: galgas extensiométricas y acelerómetros, para monitorear el desplazamiento; sensores piezoeléctricos de presión, para monitorear el grado de permeabilidad de las capas del subsuelo; sensores de humedad y pluviómetros, para monitorear la intensidad de lluvia y grado de absorción del subsuelo; y geófonos para monitorear las vibraciones del terreno.

En cuanto a la estructura de la red de monitoreo, recientes trabajos apuntan al empleo de redes de sensores inalámbricos (6-12). Las redes de sensores inalámbricos consisten en un conjunto de sensores interconectados de forma inalámbrica los cuales pueden trabajar de forma colaborativa con el propósito de optimizar el proceso de recolección de la información sensorial, la reducción del consumo energético o el seguimiento espacial y temporal de una variable. Existen diferentes propuestas que emplean redes de sensores que utilizan protocolos propietarios y la comunicación entre el nodo principal (gateway) y la central de monitoreo se realiza por medio de GSM/GPRS (6,10,11), WiFi (12) o VSAT (7,12). Sin embargo, muchas de estas soluciones requieren altos costos de mantenimiento y operación pues trabajan en bandas licenciadas. Lo cual es crítico especialmente cuando el número de sensores en la red es alto y los recursos económicos son limitados. Recientemente, se han propuesto diferentes esquemas basados en redes de banda libre que usan tecnología ZigBee para el monitoreo de variables ambientales asociadas situaciones de riesgo ambiental (7-9). ZigBee es un conjunto de protocolos de comunicación soportados en el estándar IEEE 802.15.4 el cual define el nivel físico para redes inalámbricas de área personal (PAN) con soporte para topologías en estrella, árbol y malla. Las especificaciones de ZigBee están orientadas al bajo consumo energético y una tasa de transmisión baja de hasta 205kbps en las bandas libres de 2.4GHz (16). En cuanto a los casos de éxito que usan ZigBee para el monitoreo de variables ambientales se encuentra la red propuesta por Chao et al. (7) quienes usan ZigBee para el monitoreo de deslizamientos en zonas de alta lluvia en China cuyo propósito es integrar los diferentes sensores a un sistema geográfico de información que sirva para la planificación del riesgo y el disparo de alarmas tempranas. En (7) los autores indican que ZigBee ofrece un alto grado de flexibilidad y economía comparado con otras tecnologías para la implementación de redes de sensores. Por otra parte, hay ejemplos de redes de monitoreo donde es notable el uso de redes heterogéneas empleando arquitecturas ZigBee y GSM/GPRS (8, 9). También se tienen casos éxitos en la integración de ZigBee con otras tecnologías como WiFi donde se tienen una serie de criterios y estrategias para la interoperatividad de las dos tecnologías que operan en la misma banda (17,18).

A pesar de que ZigBee está orientado a aplicaciones de área personal, se han logrado comunicaciones de

varios kilómetros (12km) en condiciones de línea directa con una potencia de transmisión de tan solo 50mW (19). Además es posible alcanzar hasta 64km con el uso de un bridge inalámbrico (XBee XTender Wireless Bridge) especialmente diseñado para ZigBee, permitiendo ampliar significativamente el alcance y manteniendo el bajo consumo de ZigBee. Por lo anterior, esta tecnología permite la construcción de redes de sensores que requieren cubrir distancias de algunos kilómetros y cuenta con la flexibilidad de soporte de las topologías de red soportadas por ZigBee en las que se pueden coordinar una gran cantidad de dispositivos finales sin la necesidad de adquirir licencias para uso del espectro por su operación en bandas libres.

A nivel local, basados en estudios realizados por Castellanos et. al. (2) y el IDEAM (3), donde se reconoce a la lluvia como factor determinante en los riesgos de deslizamiento en el país, Sánchez et. al. (20) proponen una metodología para elaborar el mapa de riesgo por deslizamiento en el territorio colombiano y un modelo para predecir alertas tempranas para este tipo de fenómenos. El modelo está basado en cuatro fases: a) la caracterización y planificación de la susceptibilidad del terreno al riesgo por deslizamiento, que considera la incidencia de 12 variables geológicas, geomorfológicas, suelo, y cobertura vegetal; b) análisis de eventos históricos para la estimación de lluvias críticas, que considera lluvias de corta duración y el efecto acumulativo de lluvias prolongadas; c) estimación de los umbrales de lluvia críticas detonantes de un deslizamiento, recurriendo a modelos de inferencia estadística y probabilidades estadísticas de exceso y periodos de retorno; d) automatización del modelo para el pronóstico y alertas tempranas, el cual implica modelos estadísticos de predicción en tiempo real. Si bien este modelo ha sido validado con datos fuera de línea, no se tiene conocimiento en el país de una red de monitoreo en tiempo real para la gestión del riesgo por deslizamiento.

3. METODO PROPUESTO

En el departamento del Quindío, el problema del deslizamiento es producido por una mezcla de diferentes eventos principalmente: lluvia y sismicidad. En el departamento existe una red sismológica y un proyecto de georeferenciación de amenazas naturales, por consiguiente, se hace necesario

disponer de información en tiempo real sobre los aspectos hidroclimatológicos para complementar el sistema de gestión de riesgo. Si bien existen cerca de 45 sitios de monitoreo de variables climatológicas en el departamento, el monitoreo de gran parte de estos sitios se realiza manualmente, por lo que no se cuenta con una red efectiva y eficiente para el monitoreo de estas variables ambientales (Fuente: IDEAM). Nuestra propuesta pretende crear una plataforma tecnológica altamente flexible que sea una alternativa de menor costo para la instrumentación de variables hidroclimatológicas además de brindar una plataforma para la investigación y el desarrollo en temas como redes de sensores inalámbricos, sistemas de información geográficos (GIS), sistemas embebidos en tiempo real y la integración de estas tecnologías en la solución de problemas reales de alta pertinencia para la sociedad Quindiana.

Con el propósito de satisfacer los costos de instalación, mantenimiento y operación, se ha adoptado en nuestro diseño una red ZigBee, dado a que no se requiere licenciamiento de bandas, y es posible la transmisión con muy bajo consumo de potencia. Asimismo, las estaciones de monitoreo están basadas en sistemas embebidos de muy bajo consumo de potencia basados en Waspote. Estos detalles se describen en las siguientes secciones.

3.1. DISEÑO DE LA ESTACIÓN

La estación meteorológica se ha diseñado para la monitorización de variables climatológicas que están involucradas con la prevención del riesgo. Entre los requerimientos de dichas estaciones están el ser integrada a una red de sensores inalámbricos y ser autónoma.

Dado que los propósitos de este proyecto es el empleo de tecnologías flexibles de bajo costo, para el diseño de la estación se optó por el empleo de módulos Waspote, que es una plataforma open-source desarrollada por Libelium. Esta arquitectura está optimizada para reducir el consumo de energía y brinda grandes posibilidades para la implementación de diversas aplicaciones. Entre las principales características de la plataforma están: micro-controlador ATmega1281 a 8MHz, SRAM de 8KB, EEPROM de 4KB, FLASH de 128KB, memoria SD Card de 2GB.

La plataforma Waspote tiene la posibilidad de

conectar diferentes opciones para comunicaciones y un gran número de sistemas de captura de información sensorial. Además, para efectos de reducir el consumo y maximizar el rendimiento y capacidades. Wasmote cuenta con un consumo de hasta 0.7 μ A en el modo de hibernación y siete modelos diferentes de radios de comunicación que pueden ser elegidos en función de frecuencia (868 MHz, 900 MHz y 2.4 GHz), protocolo (802.15.4 y ZigBee) y potencia (1mW y 100mW). Los módulos Wasmote también incluyen sensores integrados para medir temperatura en el rango entre 40°C y 85°C, con una precisión de $\pm 0.25^\circ\text{C}$, y aceleración en los tres ejes con un rango de $\pm 2\text{g}$ (1024 LSb/g) / $\pm 6\text{g}$ (340LSb/g). Además, esta arquitectura está diseñada de forma modular de tal forma que es posible adicionarle módulos de comunicación WiFi, Bluetooth, GSM/GPRS, RFID/NFC, GPS; y módulos de placas de sensores para aplicaciones de monitoreo de gases, eventos, radiación, ciudades inteligentes, meteorología, agricultura, entre otras.

En particular, para el monitoreo de variables hidroclimatológicas que se requieren para el sistema de gestión de riesgo por deslizamiento, se optó por emplear la placa de sensores de agricultura, que permite el monitoreo de la presión atmosférica, humedad de ambiente, temperatura, velocidad y dirección del viento, y medición de la precipitación de lluvias. Las características de estos sensores son: presión atmosférica (15 a 115kPa), humedad de ambiente (0 a 100%RH), temperatura (-40°C a +125°C), anemómetro (sensibilidad: 2.4km/h / giro - rango de velocidad del viento: 0 a 240km/h), dirección del viento con precisión máxima de 22.5°, y pluviómetro con capacidad del cubilete de 0.28 mm de lluvia.

En la Tabla 1 se presentan las características de la estación meteorológica y las Figura 1 el esquema de la estación meteorológica.

Respecto al mantenimiento y expansión de la red, los módulos Wasmote cuentan con la flexibilidad adicional de permitir la re-programación del software de manera remota empleando el protocolo OTA (*Over-the-air Programming*). De esta forma, es posible re-configurar la red sin necesidad de desplazarse físicamente al sitio donde se ubica el nodo. Este diseño permite la reducción de costos de mantenimiento y

Tabla 1. Características de la Estación Meteorológica

Características	Descripción
Hardware	Wasmote V1.0
Software	API V0.27
Radio de Comunicaciones	xbee 2,4 GHz (ZigBee)
Antena	5 – 15 – 24 dBi
Placa de sensores	Agricultura V 2.0
Batería	6600 mA
Panel	3 W – 12 V

re-configuración de la red de sensores.

La aplicación en la Wasmote se diseñó para permitir el control de la información sensorial, administración del consumo de la energía y la transmisión inalámbrica de los datos. Esta aplicación tiene la función principal de transmitir la información sensorial por un tiempo determinado, que ha sido calculado teniendo en cuenta el consumo eléctrico de la estación, la corriente que suministra el panel solar y el tiempo de carga de la batería, empleando el procedimiento que se describe en la Sección 4.1.

Esta aplicación ha sido diseñada con la metodología que propone el software de la Wasmote, donde existe una sección del *setup*, que es donde se configuran todos los parámetros, variables, iniciación de módulos, entre otros y un *loop* donde se ejecuta la aplicación principal. A continuación se indican las acciones que se realizan en cada una de estas funciones:

Setup:

- Definición de parámetros: Variables, Placa de Sensores, RTC, Xbee.
- Configuración de la alarma con RTC,

Loop:

- Validación de las interrupciones
 1. Si la interrupción es por Pluviómetro
 - a. Incrementa contador del pluviómetro
 2. Si la interrupción es por el reloj en tiempo real (TRC) (cada 5 min)
 - a. Lectura de los sensores
 - b. Transmisión del Número de muestra, Fecha, Hora, Batería, sensores y cuenta del pluviómetro

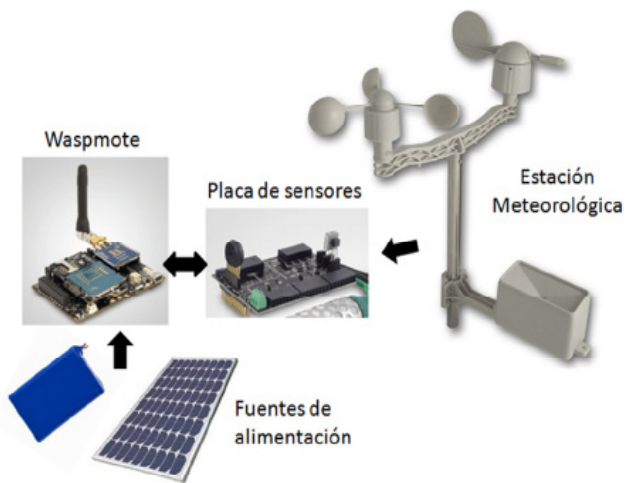


Figura 1. Estación Meteorológica

3.2. DISEÑO DE LA RED

Uno de los retos de las redes que operan en las bandas ISM como la banda de 2.4GHz es combatir los efectos de la interferencia. Para el caso de Zigbee, el efecto de la interferencia mútua con otras redes, principalmente WiFi, ha sido ampliamente estudiado, dando como resultado que WiFi y Zigbee pueden coexistir sin interferencia con una apropiada planificación de las redes, de forma que los canales de la red Zigbee se ubiquen entre los canales de WiFi. En ausencia de esta configuración, el efecto de la interferencia es una degradación de la calidad de ambas comunicaciones (WiFi y ZigBee) manifestada en un aumento en la pérdida de paquetes y una reducción de la sensibilidad del receptor.

Para nuestro caso, el problema de la interferencia wifi/Zigbee es de gran importancia al pretender diseñar e implementar una red de sensores usando el estándar de Zigbee para largas distancia (>8km) en un ambiente urbano y rural donde no es posible controlar la presencia de otras comunicaciones en la banda de 2.4GHz de manera que no se presente interferencia.

Una posible solución al problema de la interferencia se presenta con el mismo estándar de Zigbee el cual asigna el canal para la comunicación a partir de escanear el espectro y seleccionar el canal con menor interferencia y al usar como técnica de acceso al medio CDMA/CA el sistema puede funcionar con niveles tolerables de interferencia lo que implicaría la necesidad de una mayor potencia en el receptor para un correcto funcionamiento del enlace de Zigbee.

En ausencia de criterios de diseño de enlaces de Zigbee de larga distancia en presencia de interferencia que indique claramente los niveles de señal que se deben mantener para un correcto funcionamiento se realizó una campaña de medidas en un enlace prueba en un ambiente de interferencia WiFi con el objetivo de identificar el mínimo de potencia en el receptor con el cual se tenía un correcto funcionamiento del enlace para diferentes distancia y condiciones de propagación tanto con línea de vista con sin esta. Los resultados de estos experimentos se describen en la Sección 4.2, al igual que el diseño de los enlaces entre los diferentes nodos que componen la red de monitoreo completa.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CONSUMO ENERGÉTICO DE LA ESTACIÓN

Se realizó un análisis del consumo energético de la estación, con el objetivo de identificar parámetros eficaces para el uso de la batería y el panel de la estación meteorológica. Por lo anterior se identificaron los parámetros de consumo de corriente, corriente entregada y tiempo de carga del panel solar, con el objetivo de identificar la autonomía de la estación.

Para la corriente que consume la estación de monitoreo, se realizaron medidas del sistema en dos estados: estado ON, cuando el sistema está prendido, leyendo y transmitiendo los datos de los sensores a través del Xbee, y el estado SLEEP, donde el sistema “duerme” y está atento a las interrupciones del pluviómetro y de la alarma para “despertar” y volver a leer y transmitir la información de los sensores. El objetivo de esta prueba es determinar el tiempo mínimo que la estación puede estar en el estado SLEEP.

Las medidas se realizaron al sistema cuando transmitía una trama de 90 bytes cada 30 segundos. Las medidas de la corriente de la estación se realizaron de forma indirecta. Se encontró que en modo Sleep, la corriente promedio de la estación es de $I_{sleep} \approx 352$ uA, mientras que en modo ON, la corriente promedio es $I_{on} \approx 100$ mA y un tiempo de encendido promedio de $T_{on} \approx 12$ s.

Con el fin de que el sistema opere de forma definitiva, el consumo del sistema durante las 24 horas, debe ser suministrado por el panel solar durante las horas de

carga. De las pruebas realizadas se tiene que la corriente útil entregada por el panel durante el periodo de carga es el 25% de la corriente máxima (250 mA) = 62.5 mA. En pruebas de carga realizadas en Armenia, Quindío, se registró un tiempo de carga del panel de 8 horas, es decir un 33 % del día. De esta forma, la corriente media que podría consumirse para un funcionamiento autónomo es:

$$I_{media} = 0.33 \times 62.5 \text{ mA} = 21.87 \text{ mA}$$

Esta corriente media se relaciona con la corriente consumida en estado de encendido (I_{on}), la corriente en estado de dormido (I_{sleep}) y el tiempo de encendido (T_{on}) de la siguiente forma:

Esta corriente media se relaciona con la corriente consumida en estado de encendido (I_{on}), la corriente en estado de dormido (I_{sleep}) y el tiempo de encendido (T_{on}) de la siguiente forma:

$$I_{media} = \frac{I_{on} * T_{on} + I_{sleep} * T_{sleep}}{T_{on} + T_{sleep}}$$

De lo cual se obtiene la condición,

$$T_{sleep} > \frac{I_{on} * T_{on} - I_{media} * T_{on}}{I_{media} + I_{sleep}}$$

Que permite determinar un valor de 43.23 segundos como tiempo mínimo que el sistema debería dormir para el funcionamiento ininterrumpido del sistema. Este será entonces el tiempo mínimo entre transmisiones para el funcionamiento autónomo del sistema.

4.2. CAMPAÑA DE MEDIDAS DE POTENCIA RECIBIDA

Como se indicó en la Sección 3.2, para el diseño de la red inalámbrica con ZigBee fue necesario realizar una campaña de medidas con el objetivo de identificar el mínimo de potencia en el receptor y verificar la viabilidad de enlaces de larga distancia usando ZigBee.

Para el experimento se ubicó el transmisor en un ambiente urbano con alta incidencia de redes WiFi alrededor, como ocurre al interior del campus de la Universidad del Quindío, y se ubicó un receptor a manera de estación móvil en un vehículo el cual realizaría un recorrido determinando los niveles de señal con los cuáles se lograba una correcta recepción de la señal para diferentes ubicaciones. La señal transmitida con-

sistió en una trama de prueba de 92 bytes transmitidos a intervalos de 30 segundos. Los módulos Xbee Pro S2 utilizados en la prueba median la potencia de la señal recibida después de la recepción de cada trama. Se tomaron 5 medidas de potencia recibida en cada punto.

Para este estudio se realizó un conjunto de 20 puntos de medida en ambientes cercanos y lejanos de la estación transmisora de la universidad en ambientes urbanos, sub urbanos y rurales para diferentes condiciones de línea de vista. En la Figura 2 se identifican geográficamente los puntos de prueba donde fue posible una correcta recepción de la señal de prueba.

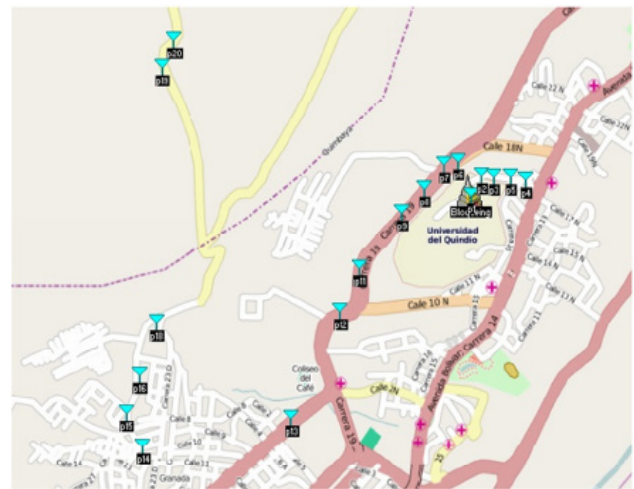


Figura 2: Puntos de prueba donde se recibió correctamente la señal transmitida desde la universidad del Quindío.

La Figura 3 resume los resultados de las mediciones realizadas para la transmisión entre dos módulos Xbee pro s2, con antenas de 5dBi y una potencia de trasmisión de 17dBm.

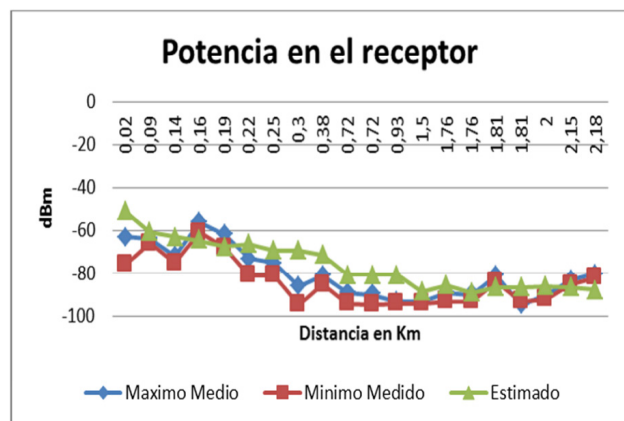


Figura 3: Potencia Recibida en el Test

El test mostró que en las condiciones de interferencia bajo las cuales se realizaron las pruebas, la recepción solo fue posible para niveles de señal superiores a -95dBm, en contraste con los -103dBm en las condiciones que reporta el fabricante del módulo.

Otro objetivo de la prueba fue el contraste de los valores medidos con las estimaciones realizadas con el software radio mobile, el cual utiliza el modelo propagación Longley Rice, con el fin de determinar un margen de error de la estimación y definir así un criterio de diseño para la red de sensores basada en las estimaciones del software.

La comparación con las estimaciones mostraron en general, una subestimación de las pérdidas del trayecto de hasta 25dB en condiciones en ausencia de línea de vista, aspecto explicable debido a que el modelo Longley Rice no cuantifica las pérdidas debidas a obstáculos locales tales como edificaciones, y en condiciones de línea de vista el peor error del modelo fue de 14.7dB.

Para la peor de las potencias recibidas en un punto, el error medio con respecto a la estimación con el modelo fue de 8.2dB, por lo tanto teniendo presente que la red se diseñará solo para condiciones de línea de vista utilizaremos como criterios:

- A) Asumir -95dBm como la sensibilidad del receptor
 - B) Considerar para el diseño las estimaciones con un margen de desvanecimiento de 15dB por encima de la sensibilidad de -95dBm con el fin de anticipar el error de la estimación y poseer al menos 6.8dB de margen de potencia en caso donde la estimación tenga el peor de los errores.
- Lo anterior implica una potencia mínima en el receptor de -80dBm.

Los anteriores criterios permiten la elección de la ganancia de las antenas en función de las pérdidas del enlace que se esté diseñando.

Con el fin de validar los criterios de diseño anteriores se plantea una prueba de mayor distancia, un enlace entre la estación base en la Universidad del Quindío y la estación peñas blancas a 8.41km de distancia, para esta prueba fue necesario aumentar las ganancias a 19.5dBi en el transmisor ubicado en la Universidad del Quindío y 19.5dBi de ganancia de la antena receptora.

La Figura 4 muestra la estimación con el radio mobile. El radio mobile estima una potencia recibida de -74.6dBm y la medición en campo mostró una señal recibida de -77dBm, logrando la recepción exitosa de los paquetes de prueba y manteniendo un margen de desvanecimiento de 18dB para combatir los desvanecimientos temporales que se causen por la variación de las condiciones de propagación e interferencia.

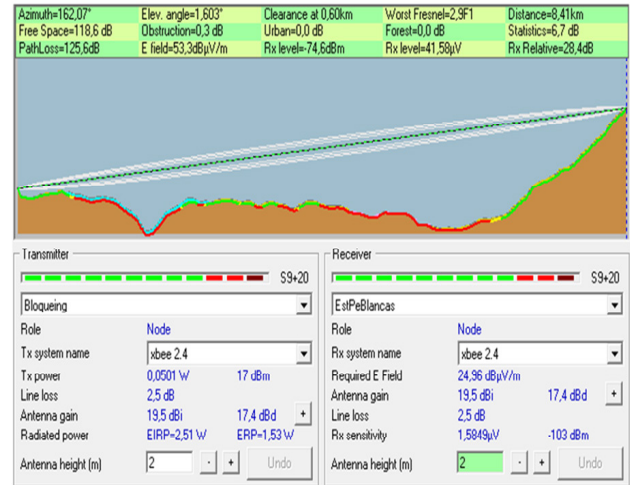


Figura 4: Presupuesto y Perfil del Enlace entre la Estación de Peñas Blancas y el Bloque de Ingeniería-UQ.

Por último, se necesita un criterio para definir la máxima ganancia que se podría usar en el diseño de la red, pues al trabajar con las bandas ISM se tienen restricciones de PIRE máximo debido a la normatividad del uso de este espectro en Colombia. Según la resolución 689 de 2004 del ministerio de comunicaciones la potencia de transmisión máxima en la banda de 2.4GHz es de 30dBm para el uso con antenas omnidireccionales de máximo 6dBi, pero para el caso enlaces fijos se pueden usar antenas de mayor ganancia reduciendo la potencia de transmisión en 1dB por cada 3dBi más de ganancia de antena.

Para el caso particular de los módulos Xbee ZB Pro S2 la potencia máxima es de 17dBm por lo tanto para aplicaciones fijas se podrían usar antenas directivas de hasta 39dBi con lo cual se podrían tener un PIRE máximo de 52dBm sin violar la legislación colombiana para el uso de la banda de 2.4GHz.

Considerando la sensibilidad de los módulos Xbee es de -95dBm en presencia de interferencia con lo cual sería posible un enlace si se producen pérdidas inferiores a 190dB ($L = P_{tx}(dBm) + G_{tx}(dBi) + G_{rx}(dBi) - \text{Sensibilidad}(dBm) = 17 + 39 + 39 + 95$) considerando el uso de las antenas de mayor ganancia permitida.

En condiciones de línea de vista, sin considerar otras pérdidas diferentes a las de espacio libre podría lograrse el enlace en cientos de kilómetros usando las antenas de 39dBi ($d[km]=10^{((L[dB]-92.45-20*\log_{10}(f[GHz])/20)} = 10^{((190-92.45-20*\log_{10}(2.4))/20)} = 3.1426e+004 \text{ Km}$).

Considerando de forma más realista el caso particular del sistema diseñado donde se usan antenas omnidireccionales de 15dBi y un margen de desvanecimiento mínimo de 15dB, las pérdidas máximas permisibles serían de 127dB ($L=P_{tx}(dBm)+G_{tx}(dBi)+G_{rx}(dBi) - \text{Sensibilidad}(dBm)-\text{Margen}=17+15+15+95-15=127$) asumiendo pérdidas de los conectores de 5dB se tendría unas pérdidas de propagación de 122dB por lo que el alcance máximo en el caso de línea de vista ideal sería de máximo 12.51km ($10^{((122-92.45-20*\log_{10}(2.4))/20)}$). Alcance que podría incrementarse aun más con antenas de mayor ganancia.

Para el caso de la red del Quindío, en la Figura 5 se muestran las posibles conexiones entre las estaciones disponibles en la región, en verde se muestran los enlaces que tienen al menos 3dB por encima del umbral de -80dBm de potencia en el receptor y en amarillo los que están por debajo de -77dBm y por encima de -85dBm, lo cual implica que aunque no tienen las condiciones más ideales es muy posible el éxito del enlace (El diseño considera antenas de 19,5 dBi).

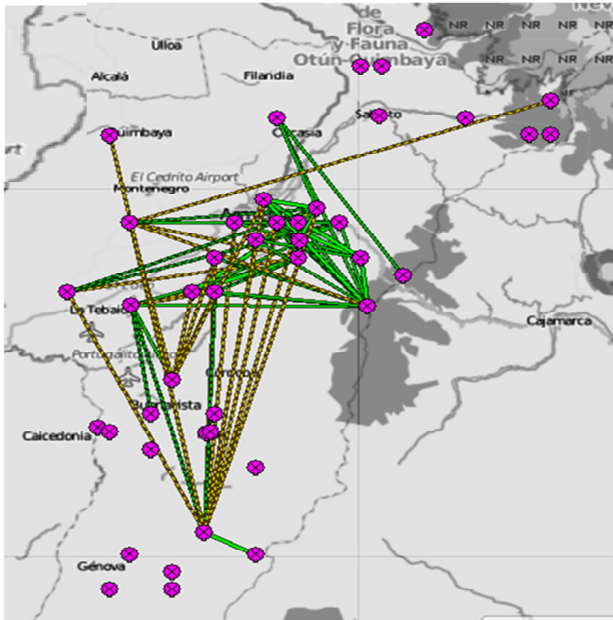


Figura 5: Conexiones entre los nodos de la red sensorial. (Red verde más de 3dB y amarillo 5dB menos del umbral de 80dBm).

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta una propuesta de solución para el monitoreo de lluvia en departamento del Quindío, con el fin de servir en una futura central para la gestión del riesgo por efecto de deslizamiento. La propuesta consideró como alternativa de bajo costo el uso de plataformas hardware libres donde se seleccionó el módulo Waspote por lo apropiado de sus características. Para garantizar la autonomía del sistema, se realizaron pruebas experimentales y análisis del consumo para las características de funcionamiento del sistema que permitieran una operación interrumpida a partir de la alimentación solar del sistema. Adicionalmente, se evaluó experimentalmente el comportamiento de los módulos de comunicación XbeePro, donde se determinó un umbral de -95 dBm como sensibilidad real de los módulos en el ambiente de interferencia presente en el campus de la Universidad del Quindío y un error medio de 8.2dB para las estimaciones de potencia recibida, realizadas a partir de la aplicación Radio Mobile, lo cual permite sugerir un potencia mínima en el receptor de -80dBm como criterio de diseño para los enlaces con los módulos XbeePro. Por último, se muestra que con el uso de la plataforma se podría interconectar con antenas de 19dBi, 30 de las 45 estaciones ubicadas en el departamento, lo cual permitiría la automatización, continuidad y disponibilidad de la información registrada por las estaciones para su uso oportuno e la prevención de desastres, entre otras aplicaciones.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Mapa de Riesgo para Navegar por Colombia. Consultado Mayo 15, 2013, en <http://www.concienciaanteelriesgo.org/inicio/>
2. Castellanos, R., Gonzalez, A. (1996). "Relaciones entre la Lluvia Anual y la Lluvia Crítica que Dispara Movimientos en Masa". En IX Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana, Santa Fe de Bogotá (4.62-4.70).
3. IDEAM. (2001). Los Fenómenos Cálido y Frío del Pacífico (El Niño - La Niña) y su incidencia en la estabilidad de laderas en Colombia. Bogotá, Colombia.
4. Espinosa, A. (2009). Estudio de Caso: Quebrada el Cofre Fase II, Volumen I - Análisis. Armenia: Editorial Universidad del Quindío.
5. Garcia O., C. A. (2009). Estudio de Caso: Quebrada el Cofre Fase II, Volumen II - Análisis. Armenia: Editorial Universidad del Quindío.
6. Mehta, P., Chander, D., Shahim, M., Tejaswi, K., Merchant, S., Desai, U. (2007). "Distributed Detection for Landslide Prediction using Wireless Sensor Network". En Int. Symp. Global Information Infrastructure Symposium, GIIS 2007. 195 -198.
7. Chao, Y., Li, Y., Qin, M. (2011). "Research on application of temporal GIS technology in monitoring landslide hazard". En Int. Conf. Multimedia Technology (ICMT). 5039 -5043.
8. Huo, Z., Zhang, P., Tao, Z., Gui, Y. (2011). "Landslides Remote Monitoring System and its shortages appeared in applications". En Int. Conf. Electrical and Control Eng. (ICE-CE). 1603 -1606.
9. Wenlong, Z., Qing, G., Baoshan, L. (2011). "Design of Landslide Warning System". En Int. Conf. on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). (1), 974-977.
10. Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., Casagli, N. (2012). "Design and implementation of a landslide early warning system". En Engineering Geology. (147-148), 124-136.
11. Kiran, Y., Mallapur, J., Sharanappa, P., Somu, P. (2012). "Angular Variation Methodology for Landslide Measurement". En Int. Conf. on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN). 47-52.
12. Ramesh, M. V. (2014). "Design, development, and deployment of a wireless sensor network for detection of landslides". En Ad Hoc Network. 13(A), 2-18.
13. Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., Casagli, N. (2012). "Landslide management