

Sistema de Monitoreo para la detección de deslizamientos en zonas de riesgo mediante algoritmos de triangulación y una red de sensores inalámbricos basado en topología Mesh

Ing. Adriana Ticonipa Gutierrez

JUNIOR

Carrera de Ingeniería de Sistemas Escuela Militar de Ingeniería

La Paz, Bolivia

aticonipag@est.emi.edu.bo



Monitoring system for the detection of landslides in risk areas through triangulation algorithms and a wireless sensor network based on Mesh topology

Resumen —El presente artículo propone el desarrollo de un sistema de monitoreo para la detección de deslizamientos en zonas de riesgo mediante una red de sensores inalámbricos basado en topología mesh y algoritmos de triangulación que permita un monitoreo remoto y en tiempo real que a partir de las variaciones en los nodos medir los movimientos relativos para llevar un registro de datos precisos y en línea para evaluar el grado de avance y la magnitud de un posible deslizamiento y de esta forma generar alertas automáticas para tomar acciones preventivas de manera oportuna.

Palabras claves — Red de sensores inalámbricos, deslizamientos, Triangulación Delaunay, Sistema de Monitoreo Remoto, Topología Malla.

Abstract - This article proposes the development of a monitoring system for the detection of landslides in risk areas through a network of wireless sensors based on mesh topology and triangulation algorithms that allow remote and real-time monitoring based on the Variations in the nodes measure related movements to carry out accurate and online data recording to assess the degree of progress and the magnitude of a possible slip and thus generate automatic alerts to take preventive actions in a timely manner.

Keywords - Wireless Wireless sensor network, landslides, Delaunay triangulation, Remote Monitoring System, Mesh Topology.

1. INTRODUCCION

La ciudad de La Paz Bolivia, es considerada una ciudad maravilla por su diversidad cultural, topografía singular, desarrollo tecnológico y turístico, lo que genera que haya un acelerado proceso de urbanización causando

asentamientos en las laderas, donde en su mayoría están pobladas por personas de bajos recursos económicos; como así también es considerada una ciudad propensa a riesgos como los deslizamientos por su topografía accidentada, por los 300 ríos que pasan sobre ella, tiene alta pendientes, aguas subterráneas, movimientos de tierra no controlados y lluvias. A lo largo de la historia se suscitaron más de 70 deslizamientos, el último hecho de gran impacto fue el deslizamiento del 30 de abril en San Jorge Kantutani. Debido a estos acontecimientos se tiene la unidad de Sistema de Alerta Temprana del SMGIR que se encarga de realizar mediciones periódicas de movimientos de las masas expuestas a amenaza de deslizamiento o con riesgo manifestado con la utilización de implementos técnicos y estudios especializados con el fin de evitar las pérdidas humanas ante la ocurrencia de un evento de riesgo, una de las técnicas más usadas para identificar la magnitud de movimiento para generar niveles de alerta, es el uso de testigos, método de estuco con vidrio para supervisar el comportamiento de deslizamiento cuando se presentan fisuras provocadas por movimientos de tierra, se colocan en los muros de las casas o puentes afectados, sin embargo la toma de datos del monitoreo de testigos es imprecisa por que no se determina la hora exacta de movimiento ya que se puede dar en la noche y el ser humano por naturaleza necesita dormir, por lo tanto no existe continuidad en la medición, no solamente se realiza de manera discontinua la supervisión de testigos, si no también se pone en riesgo la integridad del empleado técnico, ya que para realizar la supervisión debe ir a cualquier hora en caso de emergencia, además de que corre riesgo al ir evaluar el grado de avance del movimiento, ya que el comportamiento del deslizamiento es impredecible, puede ocurrir en cualquier momento, lo que impide monitorear en tiempo real, además este sistema carece de alertas automáticas por lo

que puedan no ser atendidas en plazos adecuados consecuente no se pueda tomar acciones preventivas. Por lo tanto se propone un sistema de monitoreo continuo basado en red de sensores inalámbricos de topología malla que genere alertas automáticas para tomar acciones preventivas de manera oportuna, para poder cumplir con el objetivo del presente sistema se realizó un análisis de las zonas de riesgo donde se identificó patrones y tendencias de deslizamientos para determinar el área de estudio y las variables de monitoreo, luego se implementó el algoritmo de triangulación de Delaunay para determinar los puntos de monitoreo y además lograr una cobertura optima del área de monitoreo, por se pueda incrementar puntos de monitoreo ya que estos serán reconocidos automáticamente por la red, y por último se desarrolló el diseño de la red de sensores inalámbricos para su implementación junto con el sistema de monitoreo Adriana, de esta forma mediante el sistema se pueda tomar acciones preventivas mediante alertas automáticas en caso de movimiento en zonas de riesgo para así realizar proyectos preventivos, con el fin de evitar pérdidas humanas y daños materiales. El presente artículo pondrá especial énfasis en la explicación del desarrollo de la red de sensores inalámbricos con topología malla y el algoritmo de triangulación.

II. ESTADO DEL ARTE

Las redes de sensores inalámbricos empezó como una red de boyas sumergidas para la detección de submarinos en la época de la guerra fría, en el transcurso del tiempo esta tecnología fue evolucionando hasta ser una red distribuida de sensores, hoy en día se aplica en distintas áreas como en el ámbito sanitario, ambiental, industrial, logístico, entre otros. Por lo tanto se tienen distintos trabajos realizados en torno a las WSN¹ como es el caso del trabajo Sistema de Comunicación Mediante WSN para Detección y Alerta Temprana De Deslizamientos De Tierra [1] donde se puede apreciar la utilización de sensores, placas desarrolladoras y redes de comunicación que conforman el sistema para alertar ante vibraciones que sobrepasan un valor umbral, el cual manifiesta que se ha producido un deslizamiento de tierra. Además la utilización de tres métodos de alerta, comunicación por (GSM) y (WSN) por Bluetooth. O como el caso de Red de Sensores Inalámbricos de Bajo Consumo Energético en Agricultura Hidropónica, donde se distingue el desarrollo de una red de sensores móviles orientada a monitorizar los patrones de necesidades de las plantas y tomar decisiones inteligentes según la captación de datos ambientales obtenida. La red está compuesta por nodos sensores comunicados con transeptores de radio distribuidos en una red mallada, que podría ser fácilmente adaptada a cualquier tipo de uso a petición del profesional. [2]. O como el trabajo Diseño del sistema de comunicación de una red inalámbrica de sensores, para el estudio de la salud estructural en puentes, muestra el proceso de diseño e implementación del sistema de comunicación que se utiliza en esta red de sensores; la cual se realizó en una topología de estrella con un nodo central y dos nodos remotos, los

cuales fueron implementados usando tarjetas Raspberry Pi 3. Mientras que la conexión entre los tres se hizo mediante módulos de radio nRF24L01. El sistema es capaz de detectar la cantidad de nodos activos y solicitar los datos de cada uno de estos nodos para luego almacenar los datos en un archivo local.

III. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

A. Sistema de Monitoreo

El sistema de monitoreo para deslizamientos es una combinación de componentes que permiten conocer de manera periódica los factores que pueden detonar en algún momento estos eventos .

B. Triangulación

En geometría la triangulación de un polígono es la división de área poligonal en un conjunto de triángulos por un conjunto maximal de diagonales que no se intersectan donde la unión de los triángulos formados es igual al polígono inicial, los vértices de los triángulos son vértices del polígono, y cada par de triángulos vecinos solo comparte una arista, entonces para una poligonación es necesario unir convenientemente dos o más triángulos y en la que uno o más lados son lados comunes de los triángulos adyacentes, lográndose figuras que no necesariamente han de ser triángulos, sino también: cuadriláteros, polígonos o redes conformadas por tales figuras

C. Mediana

Una mediana de un triángulo es la recta que pasa por un vértice y por el punto medio del lado opuesto. Las tres medianas de un triángulo se cortan en un punto llamado baricentro o punto mediano. Si se construye un triángulo de lámina y se apoya en el baricentro, el triángulo se mantiene en equilibrio; por eso se llama también centro de gravedad

D. Mediatriz

La mediatriz de un segmento es la recta perpendicular a el que pasa por su punto medio y tiene la propiedad de que sus puntos equidistan de los extremos del segmento. Las tres mediatrices de los lados de un triángulo se cortan en un punto llamado circuncentro, que equidista de los tres vértices del triángulo y por lo tanto es el centro del círculo que pasa por los puntos. Dicho círculo se llama círculo circunscrito

E. Triangulación de Delaunay

Se dice que una red de triángulos es una triangulación de Delaunay si todos los triángulos de la misma cumplen la condición de Delaunay. Es decir, que cada circunferencia circunscrita de cada triángulo no contiene vértices de la triangulación en su interior. Tiene como objetivo principal establecer una triangulación sobre una

Sistema de Monitoreo para la detección de deslizamientos en zonas de riesgo mediante algoritmos de triangulación y una red de sensores inalámbricos basado en topología Mesh

nube de puntos en la que los puntos más próximos entre sí estén conectados por una arista o, dicho de otra forma, en la que los triángulos resultantes sean lo más regulares posibles

F. Red Inalámbrica de Sensores

Es una infraestructura compuesta de elementos de computo, medición y comunicación, que forma un conjunto de dispositivos electrónicos con tamaño reducido, elevada autonomía y baja capacidad de cómputo, que cooperan entre sí, vía radio, para llevar a cabo un objetivo común el cual es monitorizar parámetros físico o ambientales, instalados alrededor de un fenómeno para ser monitoreado, con la capacidad de almacenar y comunicar datos en una red en forma inalámbrica, es posible considerar como sistemas distribuidos.

G. Elementos de una Red de Sensores Inalámbricos

Las redes de sensores están formadas por un conjunto de pequeños dispositivos denominados nodos sensores, con capacidad limitada de cómputo y comunicación, cuyo tiempo de vida depende de una batería adjunta al dispositivo. Típicamente, el modelo seguido por las aplicaciones es el siguiente: realizar una serie de mediciones sobre el medio, transformar dicha información en digital en el propio nodo y transmitirla fuera de la red de sensores vía un elemento gateway a una estación base, donde la información pueda ser almacenada y tratada temporalmente para acabar finalmente en un servidor con mayor capacidad que permita componer un histórico o realizar análisis de datos. Por lo tanto, en una red de sensores inalámbricos, tenemos los siguientes elementos

- Nodos inalámbricos
- Puerta de enlace
- Estación base

H. Topología en Malla

La topología en malla es un sistema multisalto, donde todos los nodos son routers y son idénticos. Cada nodo puede enviar y recibir información de otro nodo y de la puerta de enlace. La propagación de los datos a través de los nodos hacia la puerta de enlace hace posible, por lo menos en teoría, crear una red con una extensión posible ilimitada. Este tipo, también es altamente tolerante a fallos ya que cada nodo tiene diferentes caminos para comunicarse con la puerta de enlace. Si un nodo falla, la red se reconfigurará alrededor del nodo fallido automáticamente [8]

IV. METODOLOGIA PROPUESTA

En la presente sección se expone el método propuesto para el desarrollo de un sistema de monitoreo el cual consta de dos partes fundamentales la red de sensores inalámbricos y el sistema web Adriana formado por el front end y back end con el fin analizar la información

recolectada para generar alertas automáticas para tomar acciones preventivas de manera oportuna.

A. Proceso Actual

En la figura 1 se muestra el proceso actual del monitoreo de deslizamientos basado en testigos



Figura 1. Proceso Monitoreo de Testigos

En la Figura 2 se detalla el sistema propuesto el cual incluye la red de sensores inalámbricos con topología malla.

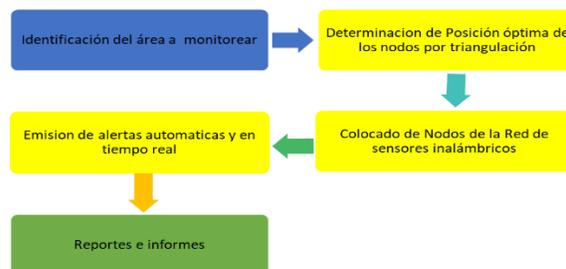


Figura 2. Sistema de Monitoreo Propuesto

B. Identificación del Área de Monitoreo

Para poder determinar el área de estudio primero se determinó los factores que implican que una zona sea más propensa al riesgo de deslizamientos, donde se identificó los factores históricos, geomorfológicos, geológicos, hidrogeológicos, estructurales y toponimia, dichos factores están plasmados en el mapa de Riesgos 2011. De acuerdo al análisis que se realizó de las tendencias de ocurrencia, patrón de movimiento y el mapa de riesgos se resaltó 2 macro distritos de mayor riesgo, el de Cotahuma y San Antonio, por distintos factores, ambas son zonas de muy alto riesgo, San Antonio presenta el 28% de total de las zonas de muy alto riesgo, a continuación le sigue Cotahuma con el 17% de total de las zonas de muy alto riesgo, además, presentan deslizamientos antiguos, la mayoría lo presenta Cotahuma, con 30, siendo los de mayor gravedad el de Cotahuma 2011, Las Lomas 2012 y San Jorge Kantutani 2019, luego sigue San Antonio con 8 deslizamientos registrados, siendo de mayor gravedad el deslizamiento de Santa Rosa de Callapa 2011 y Retamani II el febrero del 2009. Además, se consideró el movimiento registrado de Retamani es de 10 cm, por lo que se evidencia continuo movimiento de tierra por lo tanto de acuerdo a los factores identificados se determinó el Valle de las Flores como área de estudio.

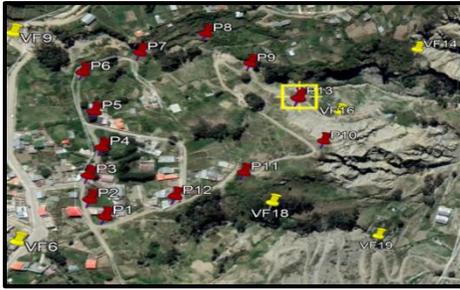


Figura 3. Area de Estudio

Otro aspecto importante es identificar la variable que sera monitorizada que pueda determinar la magnitud de movimiento, por lo que se identificó las siguientes variables mostradas en la Tabla 1, donde se identifico la vibración, humedad y inclinación del terreno, por lo que para el presente trabajo se determinó usar la variable vibracion que idica movimiento sin embargo este sistema esta orientado para implemntar otros factore de monitoreo como la humedad.

TABLA 1.
VARIABLES QUE IDENTIFICAN POSIBLES DESLIZAMIENTOS

Factor de Movimiento	Indicador
Pendiente	Inclinación de la Pendiente
Humedad	Capacidad de almacenamiento de Agua
Movimiento	Vibración Superficial
Dirección	Dirección del movimiento
Secuencia	Si el deslizamiento crece o decrece
Estado	Activo o inactivo
Tamaño	Pequeño, mediano o grande

C. Determinación de las posiciones optimas de los nodos.

Una vez identificado el área de estudio se obtuvo la forma poligonomial del área a monitorear para poder triangular el área:

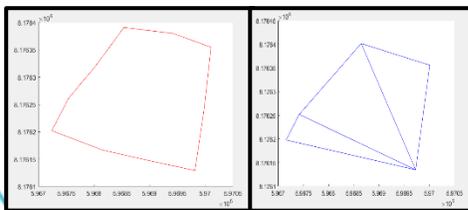


Figura 4. Forma Poligonal y Triangulación del Area

Sin embargo esta triangulación no es la óptima por que primero se halló el baricentro del área para implementar le algoritmo que halla los puntos óptimos de monitoreo, en la Figura 5 se detalla el algoritmo para hallar el baricentro y para hallar la posición de los puntos de monitoreo

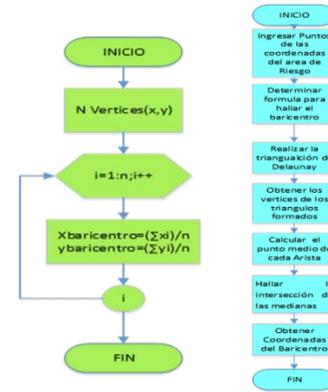


Figura 5. Algoritmo para hallar el Baricentro y Posición

En la Tabla 2 se muestra los valores de x y del punto baricentro del poligono:

TABLA 2.
PUNTO BARICENTRO

PUNTOS	x	y
BARICENTRO POLIGONO	596878	8176260

Una vez que se halló el baricentro del polígono se implementó el criterio de Delaunay, el algoritmo se muestra en la Figura 6, este diagrama explica el funcionamiento de la Delaunización, que consiste en implementar el criterio del círculo circunscrito, el cual refiere a que el círculo circunscrito del triángulo uno no debe contener cualquier vértice del triángulo adyacente, en caso de obtener un punto del triángulo dos, se considera como la unión de los vértices del triángulo uno como arista ilegal por lo que se procede a realizar otra unión de vértices hasta que cumpla con el criterio de círculo circunscrito

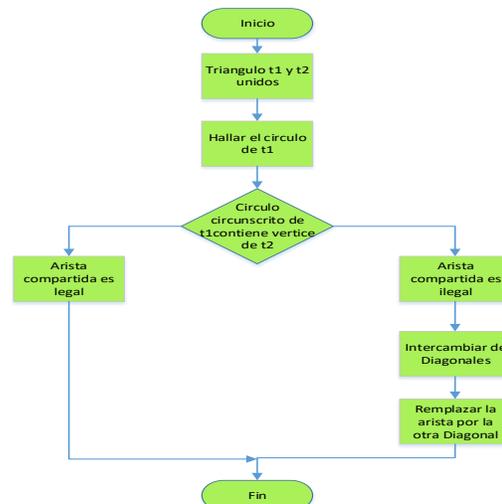


Figura 6. Algoritmo criterio de Delaunay

En la Figura 7 se muestra el algoritmo para hallar el circuncentro de los triangulos formados por Delaunay:

Sistema de Monitoreo para la detección de deslizamientos en zonas de riesgo mediante algoritmos de triangulación y una red de sensores inalámbricos basado en topología Mesh

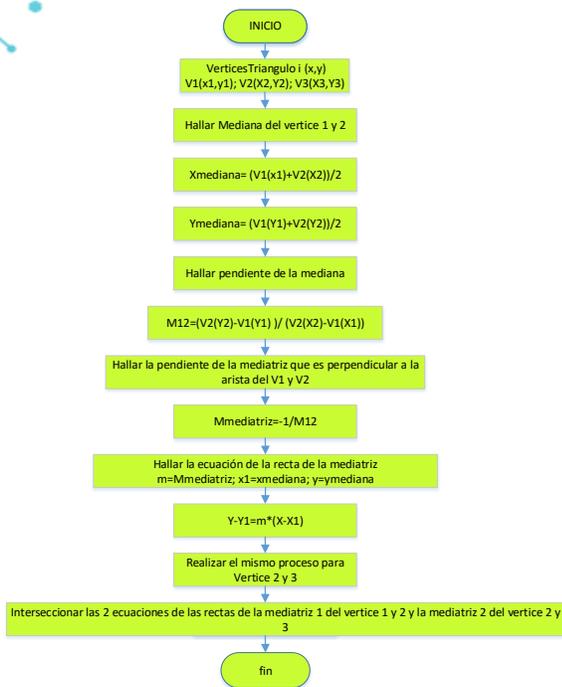


Figura 7. Algoritmo para hallar el Circuncentro

Al aplicar el criterio de Delaunay del círculo circunscrito se determinó una triangulación óptima donde un círculo solo contiene vértices de un triángulo como se muestra en la Figura 8:

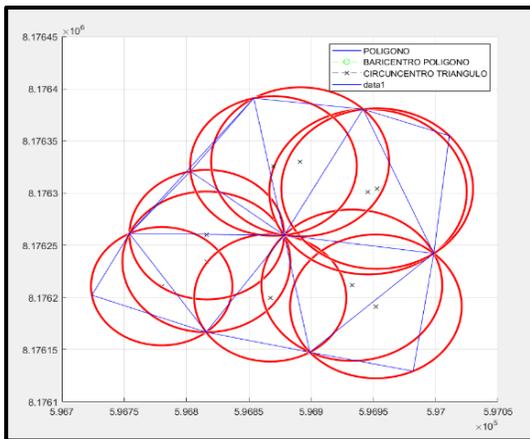


Figura 8. Criterio de Delaunay del Círculo Circunscrito

Por último una vez aplicado la triangulación de Delaunay se procedió a hallar los puntos baricentro de cada triángulo como se muestra en la Figura 9

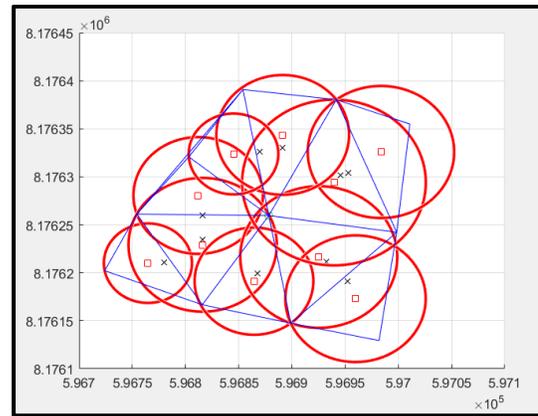


Figura 9. Baricentro de cada triángulo

En la Tabla 3 se muestra los puntos x y del baricentro de cada triángulo obtenidos:

TABLA 3.
PUNTO BARICENTRO DE LOS TRIANGULOS FORMADOS

BARICENTRO				
Triángulo	X	Y	Vértices	Radio baricentro
T 1	596765	8176210	1/2/10	41.38532
T 2	596812	8176281	2/3/12	60.82272
T 3	596816	8176229	2/10/12	69.67521
T 4	596864	8176191	9/10/12	55.81355
T 5	596925	8176216	9/7/12	73.77734
T 6	596960	8176173	9/7/8	65.94949
T 7	596940	8176294	5/7/12	86.32812
T 8	596984	8176326	5/7/6	68.79245
T 9	596891	8176344	5/4/12	62.36410
T 10	596845	8176324	3/4/12	42.11111

D. Diseño de la red de sensores inalámbricos

Para la implementación de la red de sensores inalámbricos con topología malla, primero se realizó el diseño de la red. En la Tabla 4 se detalla el escenario

TABLA 4.
ESCENARIO DEL AREA DE MONITOREO

Factor	Detalle
Area	4,55 hectáreas
Latitud	-16.493294°
Longitud	-68.091966°
Zona	Valle de las Flores
Variable a medir	Vibración y dirección de movimiento
Urbana	Urbana no poblada
Características	Movilidad, auto organización, escalabilidad, frecuencia libre y conservación de la energía
Frecuencia Inspección	24/7

Para determinar la Topología para la red se aplicó el criterio de sensibilidad, la sensibilidad se encuentra en la hoja de datos de cada componente, es decir que la potencia recibida debe ser mayor a la sensibilidad. En la Figura 10 se muestra el algoritmo implementado:

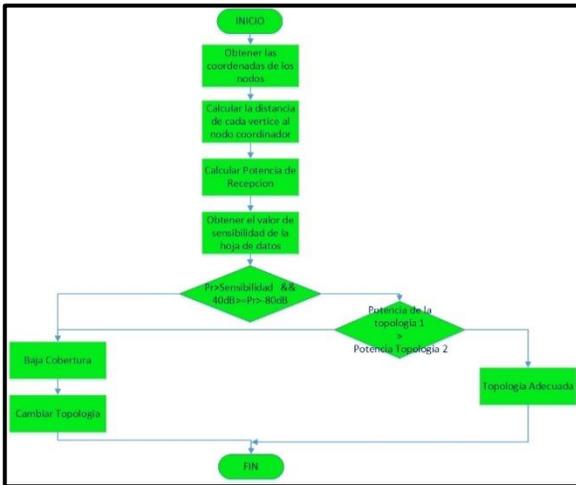


Figura 10. Algoritmo para determinar la topología

Se realizó la comparación de valores de potencia recibida para la topología malla y estrella, para árbol no se realizó debido a que si un nodo central se pierde toda su ramificación quedara excluida de la comunicación; como resultado la topología malla tuvo una potencia recibida mucho mayor a la de la topología estrella, esto se debió al factor distancia, ya que para la estrella todos los puntos se comunican al nodo central en cambio en malla se conecta al nodo más cercano por lo que la distancia es más corta. Para hallar la potencia recibida se usó la siguiente ecuación

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{RX} + G_{TX} - PL(dB)$$

Donde P_{tx} es la potencia de salida y se encuentra en la hoja de datos y G es la ganancia de la antena de transmisión y recepción igual se encuentra en la hoja de datos por lo que solo se procedió a hallar $PL(dB)$ que es la pérdida de trayecto con las siguientes ecuaciones:

$$L_o = 20 \log \frac{c}{4\pi d f}$$

$L(d_o)$ = Pérdida propagación a una distancia d_o

(d_o) = Distancia referencial entre receptor y emisor

Para el modelo de pérdida de trayecto Log Distance de una red PAN se tiene:

$$PL(dB) = L(d_o) + 10 \log \left(\frac{d}{d_o} \right) n$$

Donde n es el factor ambiente, este proyecto se consideró sistema abierto por lo tanto el valor de $n=2$. Como resultado el promedio de la potencia recibida de la topología malla fue de $-71.7040dB > -82 dBm$ que es la sensibilidad de las antenas NFR24L01.

De acuerdo al diseño lógico de la red se identificó las siguientes características de la red que se detallan en la Tabla 5:

TABLA 5. CARACTERISTICAS DEL DISEÑO LÓGICO

Factor	Detalle
Infraestructura	Sin Infraestructura
Red	PAN
Estandar	805.15.4 – NFR24L01
Frecuencia	2,4 GHz sin licencia
Sistema	Abierto
Area	4,55 Hectareas
Protocolo De Ruteo	Reactivo, AODV
Ubicación de nodos	Ver Tabla 3
Cantidad de Nodos	11

Por lo tanto, en el presente trabajo se decidió implementar la topología malla por su escalabilidad, topología dinámica, la tolerancia en fallos y por que la potencia recibida es mucho más mayor que la de estrella respecto a la sensibilidad. Además, de acuerdo a los requerimientos citados anteriormente el estándar que va de acuerdo a las necesidades de la red es el 802.15.4 porque este presenta características de ahorro de energía y acepta la topología malla, este estándar se encuentra implementado en los módulos xbee, sin embargo, por motivos de costo elevado de los módulos, se descartó la idea, por lo tanto, se decidió usar los módulos NFR24L01.

E. Análisis de la Integración de Wifi y Radio Frecuencia

En el sistema se usó dos tipos de comunicación inalámbrica, el NFR24L01 y Wifi, por lo tanto, se consideró la frecuencia a usar para evitar interferencia entre dispositivos, Wifi trabaja en distintos canales de ancho de banda donde se distingue frecuencia Baja, central y alta, por lo tanto se decidió modificar la frecuencia de los módulos NFR24L01, la banda de frecuencia es de 2400 a 2525 MHz, pudiendo elegir entre 125 canales espaciados a razón de 1 MHz.

F. Funcionamiento de la Red de Sensores Inalámbricos

La red de sensores representa un subsistema del sistema de monitoreo, que se encarga de recolectar datos del medio ambiente, procesa esta información y la envía a la nube para su almacenamiento.

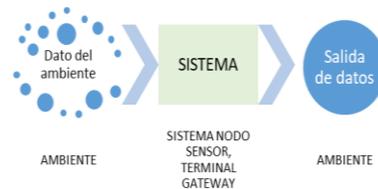


Figura 11. Sistema Red de Sensores Inalámbricos

Este sistema tiene los componentes mostrados en la Tabla 6:

Sistema de Monitoreo para la detección de deslizamientos en zonas de riesgo mediante algoritmos de triangulación y una red de sensores inalámbricos basado en topología Mesh

TABLA 6.
COMPONENTES DE LA RED DE SENSORES

Componente	Descripción
Nodo inalámbrico	Capta información proveniente del entorno en el que se encuentra, procesa y transmite inalámbricamente hacia otro destinatario. La arquitectura de un nodo inalámbrico está compuesta por un procesador, sensores, memoria, alimentación y comunicación inalámbrica.
Puerta de enlace	Es actuar como puente entre dos redes de diferente tipo.
Estación base	Equipo servidor que recolecta los datos de la red de sensores

De acuerdo al diseño lógico se determinó usar la topología malla que considera tres tipos de nodos: finales o sensores, intermedios o enrutadores y coordinadores o gateway. En la Tabla 7 se explica la función de cada nodo:

NODO	DESCRIPCION
Nodo Router o intermedio	Se encarga de almacenar, recibir datos de los nodos sensores y enviar paquetes al interior de la red, este nodo asigna direcciones por DHCP, estas direcciones son variables, pero el id del nodo es fijo.
Nodo Sensor o final o terminal	Tiene el sensor acelerómetro y giroscopio (humedad), este nodo recolecta datos de manera continua y envía datos solo si sobrepasa el umbral definido.
Nodo Gateway o Coordinador	Se encarga de recibir, almacenar, y enviar paquetes al exterior de la red y así los datos recolectados sean visualizados en una pantalla.

Tabla 7. Tipo Nodo en Topologia Malla

En la Figura 12 se describe el funcionamiento de nodo llamado sensor:



Figura 12. Sistema nodo sensor

En la Figura 13 se describe el funcionamiento de nodo intermedio o router:



Figura 13. Sistema nodo intermedio

En la Figura 14 se describe el funcionamiento de nodo Gateway o coordinador:



Figura 14. Funcionamiento Nodo Gateway

Para la configuración en arduino en la Figura 10 se describe el funcionamiento de recepción, emisión y enrutador respectivamente:

G. Diseño de la Red Física

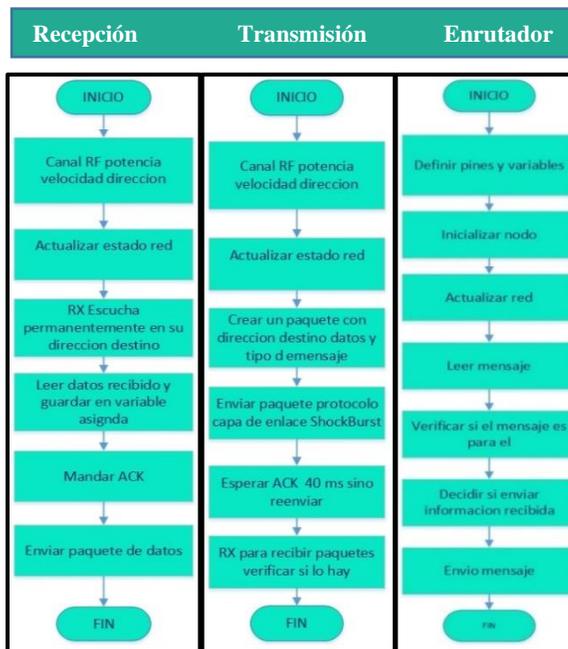


Figura 15. Recepción, emisión y Enrutador

Para el diseño físico de la red primero se identificó los componentes requeridos para la red. En la Tabla 8 se especifica el hardware requerido para cada nodo y que función tiene cada nodo:

TABLA 8.
HARDWARE DE CADA NODO

Nodo	Dispositivo	Punto
Nodo Router	Antena NFR24L01, Fuente de energía, placa Arduino, nano o node mcu	Baricentro T11, T2, T5
Nodo Sensor	Antena NFR24L01, Fuente de energía, placa arduino nano o uno, sensor de movimiento MPU6050 (sensor de humedad)	T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10
Nodo Coordinador	Antena NFR24L01 para red interna, Fuente de energía, node mcu para comunicación con la red externa	T1,T10

También se diseñó la estructura de las estacas, al considerar que será un área abierta las antenas tendrán 2 metros de altura para lograr línea de vista con el nodo gateway o el vecino próximo.

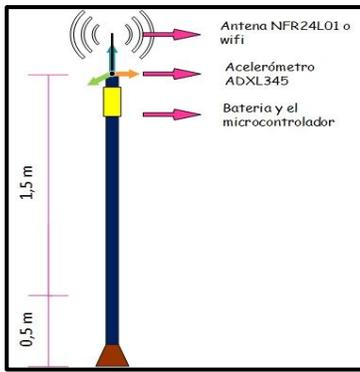


Figura 16. Diseño de la Antena

H. Conexiones

En esta parte se muestra los esquemas de los nodos de la red. En la Figura 17 se muestra el esquema de conexión del nodo Gateway

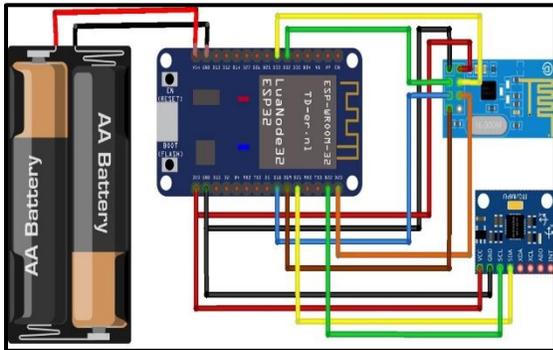


Figura 17. Esquema Nodo Gateway

En la Figura 18 se muestra el esquema de conexión del nodo sensor y enrutador

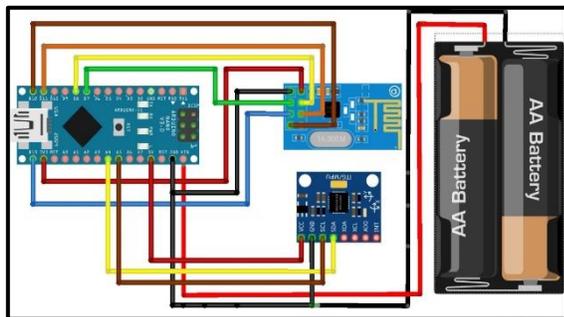


Figura 18. Esquema Nodo Sensor

I. Recolección de la Información

El primer punto es la implementación de la red de sensores inalámbricos para la recolección de la información, donde primero se aplicó factores de conversión a los datos brutos recolectados por el mpu6050 para obtener las unidades en caso de la aceleración a m/s² con valor de gravedad de 9,775 m/s² y para la velocidad angular se convirtió a %/s, previa calibración del MPU6050.

El siguiente paso fue lograr que cada nodos sensor envíe información solo si sobrepasaba el umbral de movimiento.

Para el umbral de movimiento que indica si existe movimiento se determinó usar la aceleración total.

$$a_t = \sqrt{(a_x^2) + (a_y^2) + (a_z^2)}$$

De acuerdo a las medidas se realizó un muestreo de 1000 capturas de datos de la aceleración resultante, luego se procedió a hallar la media y la desviación estándar y el error, debido a que por la sensibilidad del componente pese a que está en reposo presenta cambios en la aceleración total por tal razón se halla el error para así tener un parámetro de alarma en caso de sobrepasar el error en las medidas significa que hay movimiento, y esto será la bandera para enviar información al nodo gateway. Se usó las siguientes ecuaciones para hallar el intervalo de confianza de la aceleración:

$$\text{Promedio aceleración} = \bar{x} = \frac{\sum_1^n x}{n}$$

$$\text{Desviación estandar} x = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$\text{Error: } E_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

$$x = \bar{x} \mp t * \sigma_x$$

$$x = \bar{x} \mp t * E_x$$

Para t de student se toma el valor de 1.96, por la desviación normal estándar, por el 97,5 % del área bajo la curva se encuentra entre +1.96 y -1.96. Los datos que se toman del MPU 6050 son la aceleración total.

En la Tabla 98 se muestra el valor límite inferior y superior de la aceleración resultante del nodo 11:

TABLA 9. UMBRAL DEL NODO 11

Aceleración Resultante	Error Estándar	Desviación Estándar
Limite inferior	9.27748361	8.736119798
Limite superio	9.31287711	9.854240924

Este procedimiento se realizó para todos los nodos de la red de sensores inalámbricos. En los datos mostrados se puede observar que el intervalo de confianza hallado por el erro estándar, es más estrecho, esto se debe a que se considera el rango en base a la media la media estará entre el valor hallado, intervalo confianza para la media, en cambio el intervalo para la Desviación estándar, es más amplio, ya que calcula el intervalo de confianza para la muestra, es decir que el valor de los datos, de la aceleración que se tomaron debe estar entre el rango determinado. Por lo tanto se decide tomar como Umbral a desviación estándar, ya que nos da un rango de posibles valores, por ejemplo del nodo11, si la toma de valores no se encuentra en el intervalo 8,736 - 9,852, indica que se movió la estaca. Por lo tanto el programa se codificó para que cuando la aceleración resultante exceda el valor umbral este calcule la inclinación con el eje x y y envíe los datos el nodo sensor al Gateway para que lo suba a la nube.

Sistema de Monitoreo para la detección de deslizamientos en zonas de riesgo mediante algoritmos de triangulación y una red de sensores inalámbricos basado en topología Mesh

Se usó las siguientes ecuaciones para determinar los ángulos de inclinación

$$\text{Angulo } Y = \tan^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{y^2 + z^2}}\right)$$

$$\text{Angulo } X = \tan^{-1}\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right)$$

En la Figura 19 se muestra el proceso que realiza cada nodo sensor para enviar la información al nodo Gateway

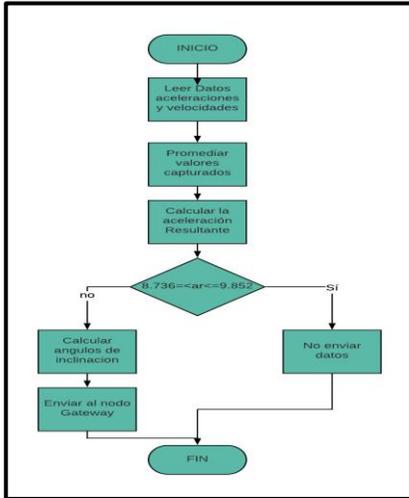


Figura 19. Procedimiento del nodo sensor

J. Configuración para la Topología Malla

Para lograr que la red sea escalable, multisalto, tolerante a fallos en caso de un nodo se desconecte se mantenga la comunicación se usó las siguientes librerías de arduino:

- RF24Mesh, permite proporcionar direccionamiento automático. Asignación dinámica de direcciones al master actualizando continuamente la tabla de direcciones
- RF24Network, asigna direcciones al hijo próximo con cifra significativa, son números en sistema octal cuando está al alcance de visión de 1 a 255.

V. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Para el proceso de experimentación se realizó

A. Comunicación Inalámbrica con Topología malla

Para verificar la topología malla se realizó pruebas de comunicación inalámbrica de envío y recepción de datos y de la asignación de dirección por DHCP para luego que el nodo master puede reconocer automáticamente a los nodos que se conectan a la red.

Cuando se conectan los nodos esclavos al master este los reconoce por su id único, y asigna una dirección. En la Figura 15, se muestra a la prueba de reconocimiento de nodos conectados a la topología malla automáticamente:

```

COM3
*****DIRECCIONES ASIGNADAS*****
NodeID: 11 RF24Network Address: 05
NodeID: 22 RF24Network Address: 04
*****DIRECCIONES ASIGNADAS*****
NodeID: 11 RF24Network Address: 05
NodeID: 22 RF24Network Address: 04
-----
ID NODO 11.00 , ESTADO 1.00 ,
AX 0.40 , AY -0.33 , AZ 9.42 , Ar9.43 , Aik 2.46 , Aiy -2.01 ,
*****DIRECCIONES ASIGNADAS*****
NodeID: 11 RF24Network Address: 05
NodeID: 22 RF24Network Address: 04
-----
ID NODO 11.00 , ESTADO 1.00 ,
AX -0.93 , AY -0.54 , AZ 11.31 , Ar11.36 , Aik -4.17 , Aiy -2.71 ,
*****DIRECCIONES ASIGNADAS*****
NodeID: 11 RF24Network Address: 05
NodeID: 22 RF24Network Address: 04
-----
ID NODO 11.00 , ESTADO 1.00 ,
AX 0.82 , AY -0.54 , AZ 7.02 , Ar7.09 , Aik 6.64 , Aiy -4.35 ,
    
```

Figura 20. Asignación de dirección por DHCP

A continuación, se realizó la prueba de la comunicación inalámbrica envío y recepción de datos

Figura 21. Envío y recepción de datos

Por último se verificó como el nodo Gateway envía los datos a la nube, donde se almacena en Firebase

```

datosProyectos
├── PROYECTO1
│   ├── dato0
│   │   ├── aceleracionX: -0.748082
│   │   ├── aceleracionY: 3.989966
│   │   ├── aceleracionZ: 9.393461
│   │   ├── estado: 1
│   │   ├── fechaHora: "2019-10-22 08:48 am"
│   │   ├── fechaMovimiento: "2019-10-22"
│   │   ├── horaFecha: 1571748493
│   │   ├── horaMovimiento: "08:48"
│   │   ├── idNodo: "N0011"
│   │   ├── idProyecto: "PROYECTO1"
│   │   ├── inclinacionX: -4.163725
│   │   ├── inclinacionY: 22.531029
│   │   ├── latitud: -16.534927
│   │   ├── longitud: -68.08744
│   │   ├── movimiento: 10.201262
│   │   └── nodo: 11
│   ├── dato10
│   └── dato100
    
```

Figura 22. Datos subidos a la nube

Una vez almacenada la información recolectada se realizó el análisis de información en el que se detecta cuantos nodos se mueven al mismo tiempo y se determina el grado de avance del deslizamiento por lo que se considera cuantos nodos de mueven del total de nodos. Para así poder generar alertas automáticas de acuerdo al grado de avance y magnitud de movimiento

En la Figura 23 se muestra el análisis de información para determinar los nodos que se mueven al mismo tiempo

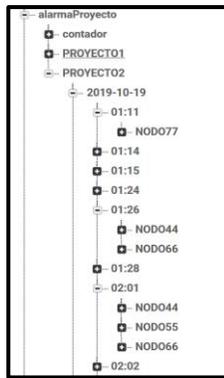


Figura 23. Nodos en Movimiento

En la Figura 24 se muestra la generación de alerta automática hallando el grado de movimiento y la magnitud del movimiento

```

-!LsIO0fsHam_B5mGKd6
-!LsIO0fsHam_B5mGKd6
  -descripcionAlarma: "EL NODO77 - SE ENCUENTRA EN BARICENTRO DEL ARE..."
  -fechaAlarma: "2019-10-28/13:22"
  -gradoAvance: "9.89%"
  -magnitud: "ALARMA AMARILLA"
  -nodos: "EL NODO77,"
  -nodos
    -NODO77: true
    -observacion: "ooo"
    -observacionTecnico: "ninguna"
  -proyecto: "PROYECTO2"
    
```

Figura 24. Generación de Alertas Automáticas

Se obtuvo los datos en tiempo real del proyecto 1 de la zona de Irpavi donde se evidenció movimiento de los 3 nodos la fecha 22 de octubre en el lapso de la madrugada de 00am a 3 am.

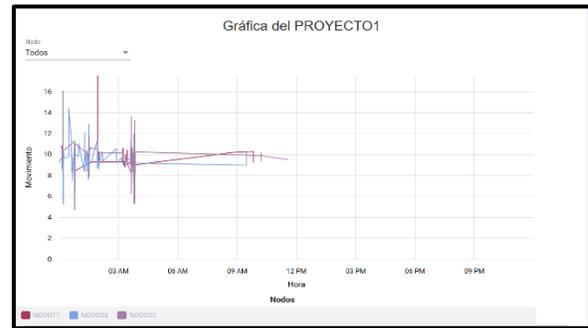


Figura 27. Graficas Movimiento Registrado Irpavi

Datos del PROYECTO1						
Nodo	Fecha	Movimiento	Inclinacion X	Inclinacion Y	Estado	Acción
11	2019/10/22 8:48:13 AM	10.201262	4.163725	22.531029	1	[Icon]
33	1966/12/31 8:00:00 PM	8.990633	16.522114	3.67488	1	[Icon]
33	2019/10/22 9:28:22 AM	9.279491	23.739498	1.446162	1	[Icon]
33	2019/10/22 9:28:26 AM	10.208131	55.631058	18.621809	1	[Icon]
11	1966/12/31 8:00:00 PM	10.285272	16.231331	15.9552	1	[Icon]
11	2019/10/22 9:50:19 AM	9.255314	0.773185	-3.891454	1	[Icon]
22	2019/10/22 10:13:01 AM	9.950802	0.622404	-7.121037	1	[Icon]
22	2019/10/22 10:13:04 AM	9.338779	0.779059	-8.077161	1	[Icon]

Figura 28. Datos Movimiento registrado en Irpavi

B. Simulación y Experimentación

Para la simulación se tomará el escenario en la zona de Irpavi y la zona de Valle de las Flores



Figura 25. Valle de las Flores



Figura 26. Colocado de Antenas en Irpavi

En la Figura 29 se muestra la graficas de movimiento de los nodos del proyecto de Valle de las flores en tiempo real donde solo se movieron 4 nodos en fecha 22 de octubre donde se registró mayor movimiento de 3 am a 6 am.

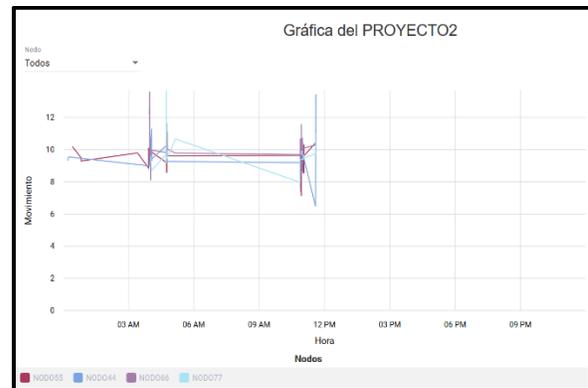


Figura 29. Graficas Movimiento Valle de las flores

Sistema de Monitoreo para la detección de deslizamientos en zonas de riesgo mediante algoritmos de triangulación y una red de sensores inalámbricos basado en topología Mesh

Datos del PROYECTO2						
Nota	Fecha	Movimiento	Inclinación X	Inclinación Y	Estado	Acción
55	2019/10/22 4:23:17 AM	9.471447	15.470247	-0.822098	1	
44	2019/10/22 10:58:23 AM	9.197242	12.466531	9.389854	1	
44	2019/10/22 10:58:28 AM	8.659181	16.974209	9.719752	1	
44	2019/10/22 10:58:44 AM	9.51412	-20.779927	-4.44708	1	
44	2019/10/22 10:58:50 AM	10.203165	-10.603952	17.981152	1	
44	2019/10/22 10:58:51 AM	9.858286	34.243487	9.348798	1	
66	2019/10/22 10:59:10 AM	10.201886	1.886922	1.258073	1	
66	2019/10/22 10:59:14 AM	10.201546	0.738806	0.827257	1	
66	2019/10/22 10:59:21 AM	9.644026	1.588853	0.330469	1	
66	2019/10/22 10:59:26 AM	10.221979	-7.101819	-7.121208	1	

Figura 30. Datos Registrados de Valle de las Flores

En la Figura 31 se muestra las alertas generadas automáticamente del proyecto de Irpavi de acuerdo a los datos recolectados por la red de sensores generando alarmas de acuerdo a la cantidad de nodos que se mueven y se obtuvo el grado de avance del deslizamiento en porcentaje:

Fecha Alarma	Grado Avance	Descripción
2019-10-22 11:25	23.24%	N00022 - Puntos de la UAM, lado derecho del punto de gravedad
2019-10-22 11:13	33.33%	N00022 - Puntos de la UAM, lado derecho del punto de gravedad
2019-10-22 09:10	33.33%	N00011 - Puntos de la UAM del patio trasero
2019-10-22 09:10	33.33%	N00020 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad
2019-10-22 08:50	33.33%	N00011 - Puntos de la UAM del patio trasero
2019-10-22 08:10	33.33%	N00011 - Puntos de la UAM del patio trasero
2019-10-22 08:10	33.33%	N00011 - Puntos de la UAM del patio trasero
2019-10-22 08:10	33.33%	N00011 - Puntos de la UAM del patio trasero
2019-10-22 08:10	33.33%	N00011 - Puntos de la UAM del patio trasero
2019-10-22 08:10	33.33%	N00011 - Puntos de la UAM del patio trasero
2019-10-22 08:10	33.33%	N00011 - Puntos de la UAM del patio trasero

Figura 31. Alertas generadas del proyecto Irpavi

Nota	Fecha	Grado Avance	Descripción	Estado	Observación	Situ.
08:50	N00011 - N00022	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00022 - Puntos de la UAM, lado derecho del punto de gravedad / N00030 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar
09:48	N00011 - N00022 - N00030	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00022 - Puntos de la UAM, lado derecho del punto de gravedad / N00030 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar
09:48	N00011 - N00020	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00020 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar
09:48	N00011 - N00020 - N00030	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00020 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad / N00030 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar
08:58	N00011 - N00020 - N00030	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00020 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad / N00030 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar
08:58	N00011 - N00020 - N00030	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00020 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad / N00030 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar
08:58	N00011 - N00020 - N00030	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00020 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad / N00030 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar
08:58	N00011 - N00020 - N00030	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00020 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad / N00030 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar
08:58	N00011 - N00020 - N00030	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00020 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad / N00030 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar
08:58	N00011 - N00020 - N00030	100.00%	Puntos de la UAM del patio trasero / N00020 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad / N00030 - Puntos de la UAM, lado izquierdo del punto de gravedad	En Espera	Pres.	Observar

Figura 32. Reporte de Alertas

En la Figura 33 se muestra las alertas generadas automáticamente de acuerdo a los datos recolectados por la red de sensores generando alarmas de acuerdo a la cantidad de nodos que se mueven y se obtuvo el grado de avance del deslizamiento en porcentaje del proyecto de Valle de las Flores:

Fecha Alarma	Grado Avance	Descripción
2019-11-05 21:56	18.18%	N00066 - AREA INTERIOR (IZQUIERDA, LADO INFERIOR) EQUIERO DE LA DIVISION / N00077 - BARRICENTO DEL AREA TOTAL, PUNTO DE GRAVEDAD DEL TERRENO
2019-11-05 21:56	9.09%	N00066 - AREA INTERIOR (IZQUIERDA, LADO INFERIOR) EQUIERO DE LA DIVISION
2019-11-04 23:28	18.18%	N00066 - AREA INTERIOR (IZQUIERDA, LADO INFERIOR) EQUIERO DE LA DIVISION / N00077 - BARRICENTO DEL AREA TOTAL, PUNTO DE GRAVEDAD DEL TERRENO
2019-11-04 23:28	9.09%	N00077 - BARRICENTO DEL AREA TOTAL, PUNTO DE GRAVEDAD DEL TERRENO
2019-11-04 20:19	18.18%	N00066 - AREA INTERIOR (IZQUIERDA, LADO INFERIOR) EQUIERO DE LA DIVISION / N00077 - BARRICENTO DEL AREA TOTAL, PUNTO DE GRAVEDAD DEL TERRENO

Figura 33. Alertas generadas en Proyecto 2

Nota	Fecha	Grado Avance	Descripción	Estado	Observación	Situ.
11:26	N00044	5.00%	N00044 - AREA INTERIOR (IZQUIERDA, LADO INFERIOR) EQUIERO DE LA DIVISION	En Espera	Pres.	Observar
11:26	N00077	5.00%	N00077 - BARRICENTO DEL AREA TOTAL, PUNTO DE GRAVEDAD DEL TERRENO	En Espera	Pres.	Observar
11:26	N00077	5.00%	N00077 - BARRICENTO DEL AREA TOTAL, PUNTO DE GRAVEDAD DEL TERRENO	En Espera	Pres.	Observar
11:26	N00077	5.00%	N00077 - BARRICENTO DEL AREA TOTAL, PUNTO DE GRAVEDAD DEL TERRENO	En Espera	Pres.	Observar
11:26	N00066	5.00%	N00066 - AREA INTERIOR (IZQUIERDA, LADO INFERIOR) EQUIERO DE LA DIVISION	En Espera	Pres.	Observar

Figura 34. Reporte de Alertas del proyecto 2

En la Figura 35 se muestra las alarmas generadas automáticamente y la notificación en tiempo real

Figura 35. Notificación de Alertas en tiempo real

Figura 36. Notificación Via Sms

Comparación de sistema actual y el propuesto

TABLA 10. COMPARACIÓN DE SISTEMAS

Factor	Sistema anterior	Sistema actual
Area de estudio	De 1 cuadra a 1 manzano o 1 hectárea	4,55 Hectáreas
Cantidad de testigos	De acuerdo al técnico encargado	11

Posicion de testigos	Donde se presenta quiebres o a criterio del técnico	Ver TABLA 4.27 Coordenadas del baricentro
Variable a medir	Distancia de las grietas de manera ortogonal y posición del testigo	Movimientos en x,y,z, y dirección del movimiento
Frecuencia inspeccion	De acuerdo a la gravedad, se realizan inspecciones diarias, semanales hasta por horas	24/7
Tecnología aplicada	Uso de testigo de estuco y vidrio	Red de sensores inalámbricos en una área WPAN, sin infraestructura, con topología malla y comunicación RF de 2,4 Ghz



Figura 37. Comparación de Sistemas

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Se logró identificar con precisión las tendencias de ocurrencia y patrones de movimiento del deslizamiento que puede aplicarse a cualquier zona de la ciudad de La Paz, es recomendable tomar conciencia que la topología de esta ciudad obliga a considerar otros factores de monitoreo y no solamente el movimiento superficial como se acostumbra en los sistemas tradicionales, sino también considerar otras variables que son significativas y afectan en un deslizamiento, como humedad, vibración, tensión del suelo, fuerza de gravedad, pendiente, dichas variables completan un monitoreo completo que es el principal aporte del presente proyecto que bien puede constituir una línea de investigación que podría continuar con otros trabajos de grado aplicable a diferentes ingenierías y carreras que ofrece la Escuela Militar de Ingeniería.

Se logró determinar la posición óptima de los nodos mediante el algoritmo de triangulación de Delaunay, se recomienda ampliar el estudio de posibles algoritmos de triangulación que justifiquen científicamente la colocación de los puntos de monitoreo en áreas de mayor extensión.

La cantidad de datos obtenidos en las pruebas e implementación del presente proyecto pueden representar un significativo aporte a la data necesaria para análisis más profundos que son de interés de otras áreas del conocimiento como geología, topografía u otra, por lo que se recomienda posibilitar el acceso a la Data para que se realice un análisis a mayor profundidad, utilizando

métodos de análisis como por ejemplo redes neuronales que podrían construir escenarios predictivos.

Habiéndose logrado desarrollar un sistema compuesto por una red de sensores inalámbricos basado en topología MESH que permitió a partir de las variaciones en los nodos, medir los movimientos relativos para llevar un registro de datos precisos y en línea para evaluar el grado de avance y la magnitud de un posible deslizamiento, se utilizaron los circuitos NFR24L01 que al no estar orientados para el trabajo en mallas se tuvo que hacer un trabajo adicional en la implementación de protocolos, se recomienda en futuros trabajos similares utilizar los módulos XBEE que determinan la distancia entre dos puntos por el factor con el que disponen estos componentes al medir la potencia recibida, esta situación, permite hallar las variaciones mínimas de distancia entre dos puntos lo que bien se puede identificar para realizar el monitoreo, también es recomendable considerar la serie de propuestas incluidas en componentes y dispositivos enmarcados de lo que se denomina Internet de las cosas

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Gobierno Autónomo Municipal de La Paz y Secretaria Municipal de Gestión Integral de Riesgos por su contribución a la investigación del trabajo, mencionar también a la Escuela Militar de Ingeniería por albergar el mismo.

Referencias

- [1] C. S. Bonilla, «Sistema De Comunicación Mediante Wsn Para Detección Y Alerta Temprana De Deslizamientos De Tierra,» Universidad Técnica De Ambato, Ambato, 2017.
- [2] C. Cambra, S. Sendra y J. Lloret, «Red de Sensores Inalámbricos de Bajo Consumo Energético en Agricultura Hidropónica,» *JITEL XIII Jornadas de Ingeniería Telemática*, vol. I, pp. 56-65, 2017.
- [3] A. ., Vargas, «Diseño del sistema de comunicación de una red inalámbrica de sensores para el estudio de la salud estructural en puentes,» *Tecnologico de Costa Rica*, vol. 1, nº 2, p. 82, 2016.
- [4] J. Suarez, Deslizamientos. Análisis Geotécnico Volumen 1, 2009.
- [5] F. Galvez, Topografía II Triangulación, Universida Privada del Norte, 2009.
- [6] E. de Orteza, Geometría Analítica y Trigonometría, Mexico: Pearson Educación de Mexico, 2001.
- [7] D. Comer, Computer Networks and Internets 6th Edition, West Lafayette: Pearson., 2015.
- [8] R. Fernandez y V. Pernía, Redes Inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica, España: Universidad de la Rioja, 2009, p. 95.

Fecha de Envío del Artículo: 28/10/2020

Fecha de Aceptación de artículo: 15/11/2020