


Artículo original

# Sistema de monitoreo y alerta temprana para deslizamientos de tierra por lluvias en una quebrada de Tacna: Implementación de una red inalámbrica de sensores

Monitoring and Early Warning System for Rain-Induced Landslides in a Ravine in Tacna: Implementation of a Wireless Sensor Network


**Tito Leoncio Córdova Miranda<sup>1</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0001-5060-0221>


**Hugo Javier Rivera Herrera<sup>2</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0002-9896-5008>


**Jeanpier Billy Mamani Coaquira<sup>3</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0001-9967-3632>

**William Eduardo Salgado Villanueva<sup>4</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0002-1964-0230>

**Mauricio Andree Maquera Aguilar<sup>5</sup>**

 <https://orcid.org/0009-0003-8875-1908>

Recibido: 9/10/2023

Aceptado: 3/12/2023

Publicado: 26/12/2023

<sup>1,2,3,4,5</sup>Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú



## Resumen

Los deslizamientos de tierra, desencadenados por intensas lluvias, constituyen desastres naturales de alcance global que provocan estragos en personas e infraestructuras. Es crucial desarrollar sistemas predictivos y alertas eficaces, incorporando tecnologías como el Internet de las cosas (IoT) para recopilar datos ambientales y prevenir pérdidas significativas. Por lo tanto, el objetivo del estudio fue diseñar y desarrollar un sistema de alerta temprana para deslizamientos de tierra, utilizando una red inalámbrica de sensores y microcontroladores. Se emplearon un pluviómetro digital de balancín y los sensores MPU 6050, DHT22 y FC-28. Estos sensores fueron distribuidos en nodos a lo largo de la Quebrada del Diablo en la ciudad de Tacna. Los valores capturados en cada nodo fueron procesados por la placa de desarrollo DEVKIT V1 NodeMCU-32, basada en el microcontrolador ESP32, y transmitidos hacia un nodo central mediante una red malla ZigBee utilizando dispositivos XBee3 de Digi. El nodo central se conectó a la nube Blynk a través de WiFi para monitorizar los valores registrados en cada ubicación. En caso de una condición de alerta, el nodo de alarma se activa de forma remota, facilitando la evacuación de personas en riesgo. La funcionalidad de la red inalámbrica de sensores se verificó mediante la medición del RSSI, y se demostró la eficacia del registro de datos en el nodo central y la activación remota de la alarma.

**Palabras clave:** alerta temprana; deslizamiento de tierra; IoT; red inalámbrica de sensores.

## Abstract

Landslides, triggered by heavy rains, constitute globally impactful natural disasters that wreak havoc on both people and infrastructure. It is crucial to develop predictive systems and efficient alerts, incorporating technologies such as the Internet of Things (IoT) to gather environmental data and prevent significant losses. Therefore, the aim of the study was to design and develop an early warning system for landslides using a microcontroller-based wireless sensor network. A digital rocker rain gauge and the MPU 6050, DHT22 and FC-28 sensors were employed. These sensors were distributed at nodes along the Quebrada del Diablo in the city of Tacna. The values captured at each node were processed by the DEVKIT V1 NodeMCU-32 development board, based on the ESP32 microcontroller, and transmitted to a central node through a ZigBee mesh network using Digi's XBee3 devices. The central node was connected to the Blynk cloud via Wi-Fi to monitor the recorded values at each location. In the event of an alert condition, the alarm node is remotely activated, facilitating the evacuation of people at risk. The functionality of the wireless sensor network was verified by measuring the RSSI, thus demonstrating the effectiveness of data logging at the central node and remote alarm activation.

**Keywords:** early warning; landslide; IoT; wireless sensor network.

## 1. Introducción

El término deslizamiento de tierra involucra el movimiento de escombros, rocas o tierra en una pendiente (Highland & Bobrowsky, 2008). Una de las causas que la provocan son las lluvias intensas, en Perú denominados huaycos. Los huaycos son un fenómeno geológico de drenaje natural resultante de lluvias torrenciales y breves. Se trata de un flujo de lodo y agua que transporta una carga compuesta por rocas, causando destrucción en su cauce (Guadalupe & Carrillo, 2012).

El impacto de los huaycos puede ser directo, ocasionando daños a personas y construcciones, o indirecto, afectando al turismo, el medio ambiente y la economía (Kjekstad & Highland, 2008; Trezzini et al., 2013; Turner, 2018).

Los sistemas de alerta temprana mitigan los efectos de los huaycos, especialmente en aquellas áreas donde las personas han construido cerca de cauces secos, generalmente poblaciones de menores recursos económicos. Estos sistemas actúan monitoreando y detectando eventos naturales potencialmente peligrosos desde etapas iniciales, lo que posibilita la evacuación hacia zonas seguras y la preparación de recursos de emergencia.

Las redes inalámbricas y el Internet de las cosas (IoT) proporcionan la plataforma necesaria para que estos sistemas integren sensores y los conecten en tiempo real para monitorear eventos y recopilar datos. Pluviómetros, acelerómetros, sensores de temperatura y humedad, entre otros, generan datos que son analizados en un nodo central que los procesa y emite la alerta. Varios autores han aplicado el IoT a sistemas de alerta temprana de deslizamientos, describiendo diversas arquitecturas basadas en los niveles físico, de red y de aplicación (Thirugnanam et al., 2022).

Entre 2004 y 2016, se registraron 4862 eventos de deslizamientos de tierra en todo el mundo. Perú, ubicado en Sudamérica, en la zona de la Cordillera de los Andes, es propenso a este tipo de eventos naturales (Froude & Petley, 2018), los cuales se atribuyen al cambio climático.

En la región de Tacna, ubicado al sur de Perú, en febrero de 2019, se registraron huaycos en las provincias de Tacna y Jorge Basadre, como resultado de lluvias de moderada a fuerte intensidad, siendo el Centro Poblado de Mirave el área más afectada. Ambos deslizamientos fueron causados por el fenómeno El Niño, el cual es recurrente en la región. El aumento de las lluvias provocado por este fenómeno natural activa las quebradas, dando lugar al deslizamiento de lodo y basura que ha sido arrojada por la actividad humana (Ministerio de Salud, 2019).

De manera similar, en febrero de 2020, un huayco de grandes proporciones, resultado de intensas lluvias, dejó cuatro personas fallecidas y una veintena de heridos en la denominada Quebrada del Diablo. Este evento provocó la inundación de la zona de La Florida en el distrito Alto de la Alianza. Asimismo, generó un huayco de magnitud similar en la zona de la quebrada de Caramolle. Los riesgos geológicos presentes en ambas áreas están determinados por las características geológicas y la inclinación de las laderas. Entre los peligros más comunes y frecuentes se encuentran el desprendimiento de rocas y deslizamientos, seguidos por la erosión de las laderas y los flujos de lodo (INGEMMET, 2020).

De modo que, el objetivo del estudio fue diseñar y desarrollar un sistema de alerta temprana para huaycos en la zona de la Quebrada del Diablo, ubicada en la ciudad de Tacna,

Perú, empleando una combinación de sensores de bajo costo y una red inalámbrica de sensores basada en el protocolo Zigbee, conectados a internet a través de WiFi.

## 2. Metodología

### 2.1. Lugar de estudio

El área de estudio está constituida por la zona de la Quebrada del Diablo, como se muestra en la Figura 1, ubicada en la ciudad de Tacna, con coordenadas de latitud  $17^{\circ}59'51.51''S$  y longitud  $70^{\circ}15'56.51''O$ . La cuenca de la Quebrada del Diablo tiene una longitud aproximada de 25 km, y sus laderas presentan pendientes de alrededor de  $30^{\circ}$  en promedio (INGEMMET, 2020). A lo largo de la carretera que conecta la provincia de Tacna con la provincia de Tarata, la cual atraviesa el cauce, se cuenta con cobertura 4G de un operador nacional. Sin embargo, en la misma vertiente de la quebrada, no se dispone de servicio de telefonía e internet.

Figura 1

Zona de estudio en la quebrada del diablo

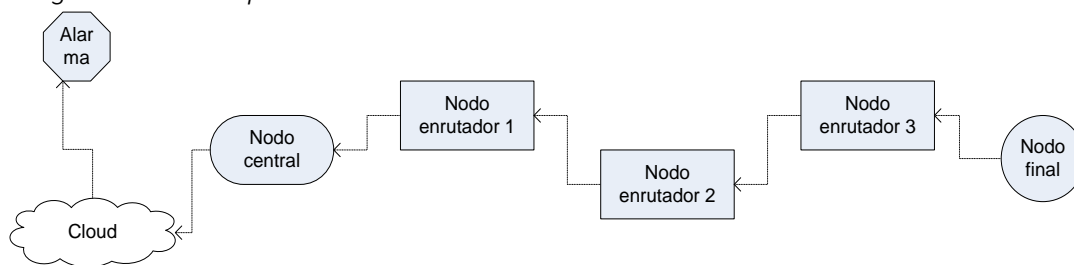


### 2.2. Arquitectura del sistema

El sistema está compuesto por un nodo central, un nodo final, tres nodos enrutadores y un nodo de alarma, como se ilustra en la Figura 2. La arquitectura del sistema se fundamenta en los tres niveles de los sistemas IoT: el nivel de percepción, el nivel de red y el nivel de aplicación (Sethi & Sarangi, 2017).

El nivel de percepción, también conocido como nivel físico, está conformado por sensores diseñados para recopilar información relevante para el monitoreo de condiciones ambientales y la activación del sistema de alerta temprana de huaycos. Estos sensores incluyen principalmente dispositivos de movimiento, temperatura y humedad ambiental, humedad del suelo e intensidad de lluvia (Hakim et al., 2020; Sofwan et al., 2018; Mahardika et al., 2023; Yulia et al., 2023; Abraham et al., 2020). Estos dispositivos están integrados en el nodo final y en los nodos enrutadores, los cuales son alimentados por baterías. Los detalles sobre la implementación de estos nodos se encuentran en la siguiente sección.

Figura 2  
Diagrama de la arquitectura de la red



El nivel de red posibilita la conexión entre los dispositivos inteligentes y/o los servidores. Se emplea el protocolo ZigBee, basado en la especificación IEEE 802.15.4, para facilitar la comunicación entre el nodo final, los nodos enrutadores y el nodo central. A su vez, el nodo central se conecta a la base de datos alojada en la nube mediante WiFi.

Una vez que los datos son recibidos por el nodo central, se presentan a través de una interfaz al usuario final mediante el nivel de aplicación para su monitoreo. En caso de que se presenten condiciones de huayco, el sistema activa automáticamente una alarma para facilitar la evacuación de personas.

De acuerdo con las características geográficas de la zona, se consideraron tramos que van desde 27,2 m hasta 63,7 m en el diseño, asegurando así una línea de vista entre los nodos de la red inalámbrica de sensores. El nodo central se encuentra ubicado en la berma de la carretera Tacna–Tarata, donde hay cobertura 4G proporcionada por un operador nacional. Los nodos enrutadores y el nodo final están distribuidos según se muestra en la Figura 3. En los puntos de instalación de los nodos enrutadores y el nodo final, no se cuenta con una cobertura de servicio de telefonía e internet confiable. El nodo de alarma está situado en la Asociación de Vivienda La Florida, en el distrito Alto de la Alianza.

Para evaluar el rendimiento de la red Zigbee, se empleó el parámetro Indicador de Intensidad de Señal Recibida, RSSI (por sus siglas en inglés: *Received Signal Strength Indicator*), según lo propuesto por Samijayani et al. (2020). Se considera que la potencia de las ondas electromagnéticas propagadas en sistemas inalámbricos de comunicación se ve afectada por fenómenos físicos como la reflexión, difracción y dispersión, como menciona Li et al. (2009).

Los módulos Zigbee permiten la medición del RSSI, que es la potencia recibida medida en cada trama recibida. El RSSI en dBm se calcula de acuerdo con las ecuaciones 1 y 2:

$$RSSI = P_T - PL(d) \tag{1}$$

Con:

$$PL(d) = PL_0 + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \sigma \tag{2}$$

Se puede considerar que  $PL_0$  es igual a 35dBm, obtenido de la ecuación de Friis para un valor de frecuencia de 2,4 GHz y un valor de  $d_0$  igual a 1 m. El valor de  $\gamma$  depende del entorno y puede oscilar entre 2 y 6, mientras que la desviación estándar puede variar entre 2 y 14, según Mohammed (2016).

En este trabajo, los valores de RSSI para el nodo local y el nodo remoto se calcularon directamente mediante el software XCTU.

**Figura 3**  
*Distribución de nodos en la zona de estudio*



## 2.3. Implementación del sistema

### 2.3.1. Diseño de hardware

En el sistema diseñado, los sensores adquieren datos de las condiciones ambientales y del suelo de la quebrada, transmitiéndolos al nodo central a través de los nodos enrutadores. Estos últimos, además de retransmitir los datos provenientes del nodo final hacia el nodo central, transmiten también sus propios datos adquiridos por sensores integrados a ellos. El nodo central recibe todos los datos, los analiza y, si existe riesgo de huayco, envía una señal de activación remota al nodo de alarma. Simultáneamente, el nodo central envía los datos recibidos a una base de datos IoT alojada en la nube, facilitando así el monitoreo de las condiciones ambientales y del suelo en la quebrada.

La tabla 1 muestra la distribución de dispositivos en cada uno de los nodos que conforman el sistema diseñado.

**Tabla 1**  
*Distribución de dispositivos por nodos*

Dispositivo	Nodo central	Nodo enrutador 1	Nodo enrutador 2	Nodo enrutador 3	Nodo final	Nodo alarma
Sensor de humedad de suelo	X	X	X	X	√	X
Sensor de intensidad de lluvia	X	√	X	X	X	X
Sensor de vibración	X	√	X	√	X	X
Sensor de temperatura	X	X	√	X	X	X
Sensor de humedad	X	X	√	X	X	X
Tarjeta de desarrollo /Microcontrolador	√	√	√	√	√	√
Módulo de comunicación inalámbrica	√	√	√	√	√	√
Módulo de alimentación de energía	√	√	√	√	√	√

Para el sensor de humedad del suelo, la humedad del suelo se mide mediante el dispositivo FC-28, un sensor de bajo costo y consumo de energía. Este sensor, a través de una salida analógica, facilita el monitoreo de la humedad del suelo. Para su funcionamiento, se dispone del driver LM393, que permite ajustar su nivel de sensibilidad. El voltaje de operación del sensor oscila entre 3,3 V y 5 V, y el error de salida varía entre 0,39 y 0,71 (Sofwan et al., 2018).

En el caso del sensor de intensidad de lluvia, uno de los parámetros comúnmente empleados en el estudio de deslizamientos de tierra provocados por lluvias es el umbral de lluvia. Para determinar este umbral, es necesario medir tanto la intensidad como la duración de la lluvia (Segoni et al., 2018). Con este propósito, el prototipo incluye un pluviómetro digital de balancín que acumula 0,2794 mm de lluvia por cada pulso generado.

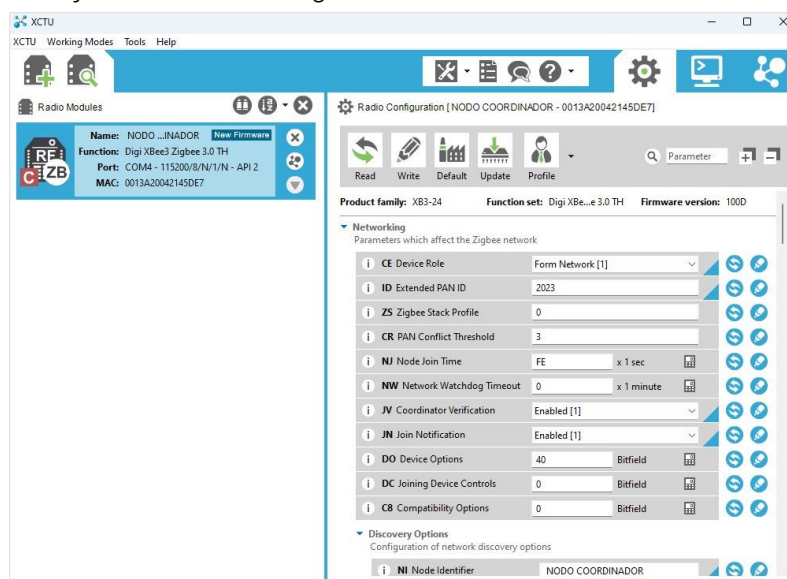
El sensor de vibración se utiliza para medir las vibraciones en el suelo causadas por el lodo y las rocas que son arrastrados por los huaycos. Para el prototipo, se empleó el dispositivo MPU6050 Motion Tracking. El MPU6050 es un sensor de movimiento de 6 ejes que integra un giroscopio de tres ejes, un acelerómetro de tres ejes y un procesador digital de movimiento, utilizando la interfaz I<sup>2</sup>C. Su rango de alimentación fluctúa entre 2,375 V y 3,46 V (InvenSense Inc., 2023). El MPU6050 es un dispositivo de bajo costo y bajo error utilizado en sistemas de alerta temprana (Hakim et al., 2020).

Para medir la temperatura y humedad del ambiente, se utilizó el dispositivo DHT22. El DHT22 es un dispositivo digital de bajo costo y bajo consumo, con una precisión de 0,5 °C en entornos de cambio de temperatura gradual y un 2 % en la medición de la humedad (Ahmad et al., 2021; Abdulrazzak, 2018).

Para el desarrollo del prototipo, se utilizó la placa de desarrollo DEVKIT V1 NodeMCU-32, la cual se basa en el SoM ESP-WROOM-32, que contiene el SoC ESP32 con el microprocesador Tensilica de 32 bits Single-/Dual-core CPU Xtensa LX6. Cuenta con una memoria flash de 4 MB y una SRAM de 520 KB. Además, es compatible con la comunicación WiFi según el estándar IEEE 802.11 b/g/n (Espressif Systems, 2023). El ESP-WROOM-32 es un dispositivo de bajo costo diseñado para diversas aplicaciones en el Internet de las Cosas (IoT) (Venkatesh et al., 2022; Oturak & Dursun, 2021; Medeiros & Girao, 2020).

Para establecer la comunicación entre los distintos nodos de la red, se empleó el protocolo ZigBee mediante los dispositivos Xbee3 de Digi. ZigBee opera sobre el estándar IEEE 802.15.4 en la banda industrial, científica y médica. Es una tecnología de bajo costo y flexible, ideal para aplicaciones IoT (Balto et al., 2023; Chaudhry et al., 2020; Mishra et al., 2019), que permite extender el alcance de la red mediante la configuración de nodos. Los dispositivos XBee de Digi pueden configurarse para operar como nodo coordinador, como nodo enrutador o como end device mediante la plataforma X-CTU, como se muestra en la Figura 4. Trabajan en la banda de 2,4 GHz, poseen una tasa de transferencia de 250 Kbps y un alcance exterior con línea de vista de hasta 3200 m. Su potencia de transmisión es de +19 dBm y su sensibilidad en la recepción es de -103 dBm. En transmisión, su consumo de corriente es de 135 mA a +19 dBm y en recepción de 17 mA (Digi, 2022). En el diseño del sistema, se utilizó una antena dipolo de 2,4 GHz para XBee3 RPSMA de 3 dBi de ganancia.

Figura 4  
Plataforma X-CTU de Digi



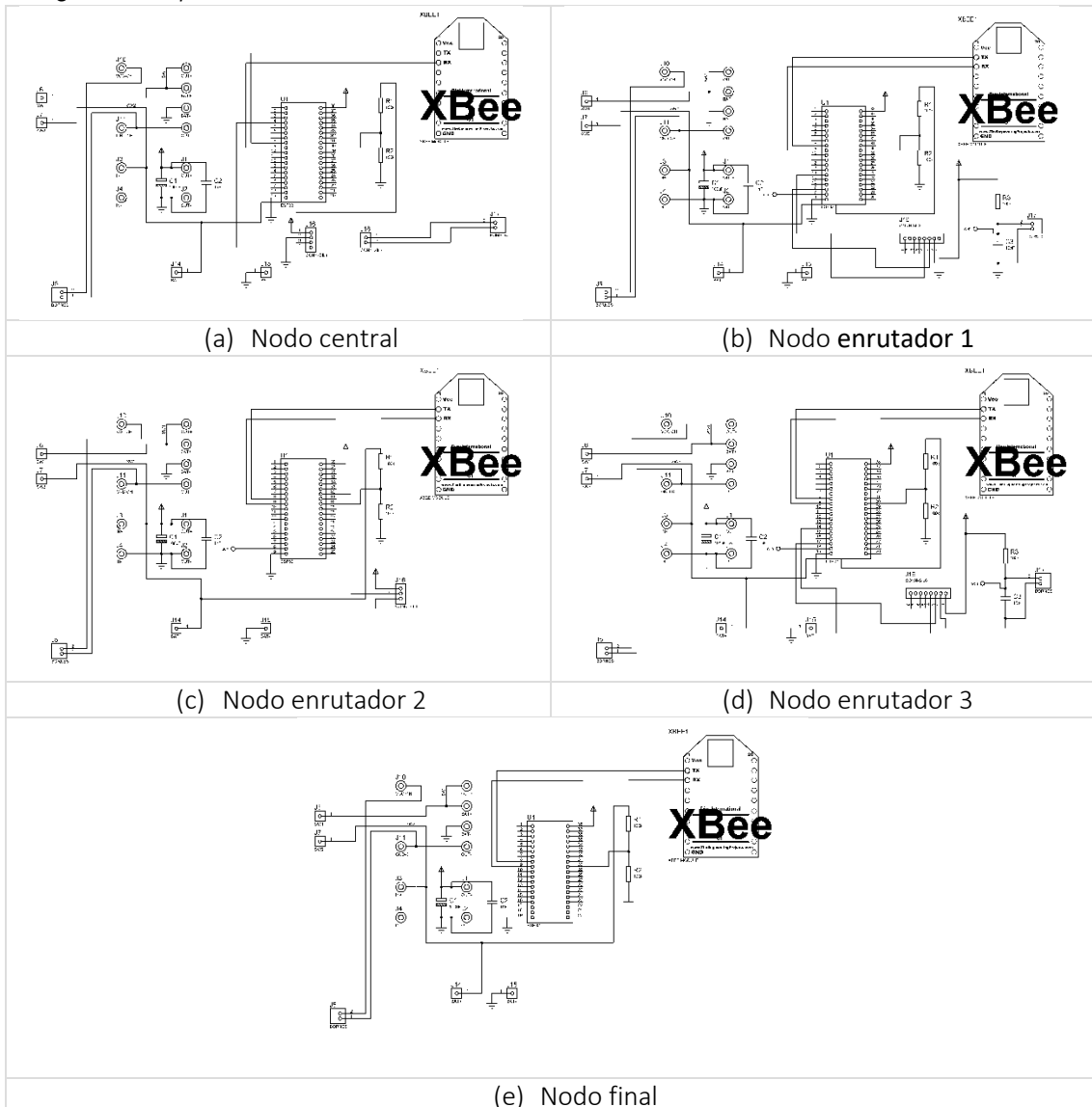
Para la comunicación con la plataforma alojada en la nube, se utilizó el protocolo IEEE 802,11 b/g/n, el cual es compatible con las tarjetas de desarrollo tanto en el nodo central como en el nodo de alarma.

El módulo de alimentación de energía consta de una batería de litio de 3,7 V, un convertor de voltaje MT3608 que eleva la tensión de 3,7 V a 5 V, un cargador de batería de litio TP4056 y un interruptor para encender o apagar el sistema.

La Figura 5 muestra el diagrama de cada nodo que forma parte de la red.



Figura 5  
Diagrama esquemático de cada nodo



### 2.3.1. Diseño de software

La programación se llevó a cabo en el entorno de desarrollo integrado (IDE) Arduino. Se empleó el algoritmo descrito en la Tabla 2 para el nodo central.

Tabla 2  
Algoritmo del nodo central

Nodo central	
Paso 1.	Declara librerías
Paso 2.	Declara variables
Paso 3.	Configura transmisión/recepción del XBee
Inicio bucle	
Paso 4.	Recibe los datos provenientes de los nodos enrutadores y del nodo final
Paso 5.	Discrimina datos según el nodo de donde provienen

**Tabla 2** (continuación/1)

Paso 6.	Muestra los datos en el monitor serial
Paso 7.	Publica datos en broker en la nube para su monitoreo por el usuario de forma remota
Paso 8.	Evalúa condición de alerta de huayco mediante datos de los acelerómetros
Paso 9.	Si hay condición de huayco
Paso 10.	Coloca la alerta de huayco en nivel alto
Paso 11.	Publica en broker en la nube para activar la alarma
Paso 12.	Caso contrario
Paso 13.	Mantiene la alerta de huayco en nivel bajo
Paso 14.	Publica en broker en la nube para mantener alarma desactivada
Fin bucle	

El funcionamiento tanto del nodo final como de los nodos enrutadores es muy similar, ya que siguieron el mismo algoritmo mostrado en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Algoritmo de nodos enrutadores*

Nodo final / Nodos enrutadores	
Paso 1.	Declara librerías
Paso 2.	Declara variables
Inicio bucle	
Paso 3.	Recibe datos de los sensores
Paso 4.	Conforma las tramas XBee
Paso 5.	Transmite las tramas XBee
Fin bucle	

El nodo de alarma se encarga únicamente de activar un sonido de alerta cuando se presentan las condiciones de huayco. Utiliza el algoritmo que se describe en la Tabla 4.

**Tabla 4**

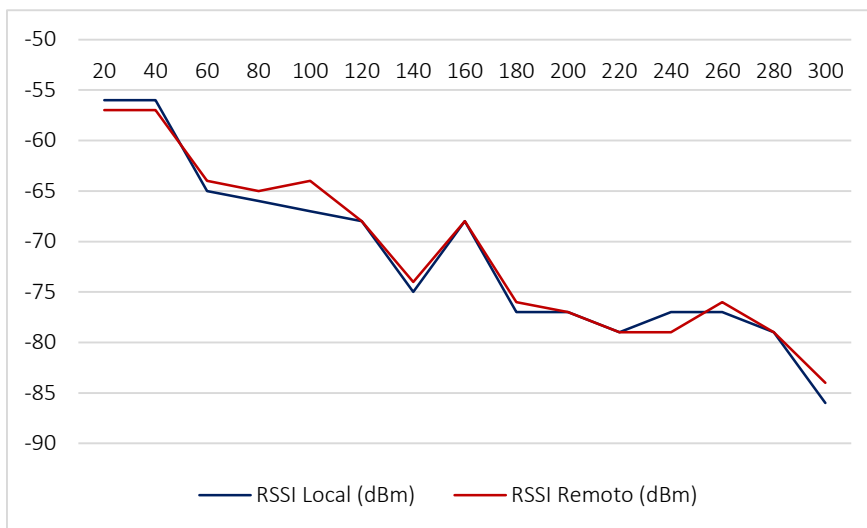
*Algoritmo de nodo final*

Nodo de alarma	
Paso 1.	Declara librerías
Paso 2.	Declara variables
Inicio bucle	
Paso 3.	Lee el estado de alerta publicado por el nodo central
Paso 4.	Si el estado de alerta es alto
Paso 6.	Enciende sonido de alerta
Paso 7.	Caso contrario
Paso 8.	Mantiene alarma apagada
Fin bucle	

### 3. Resultados y Discusión

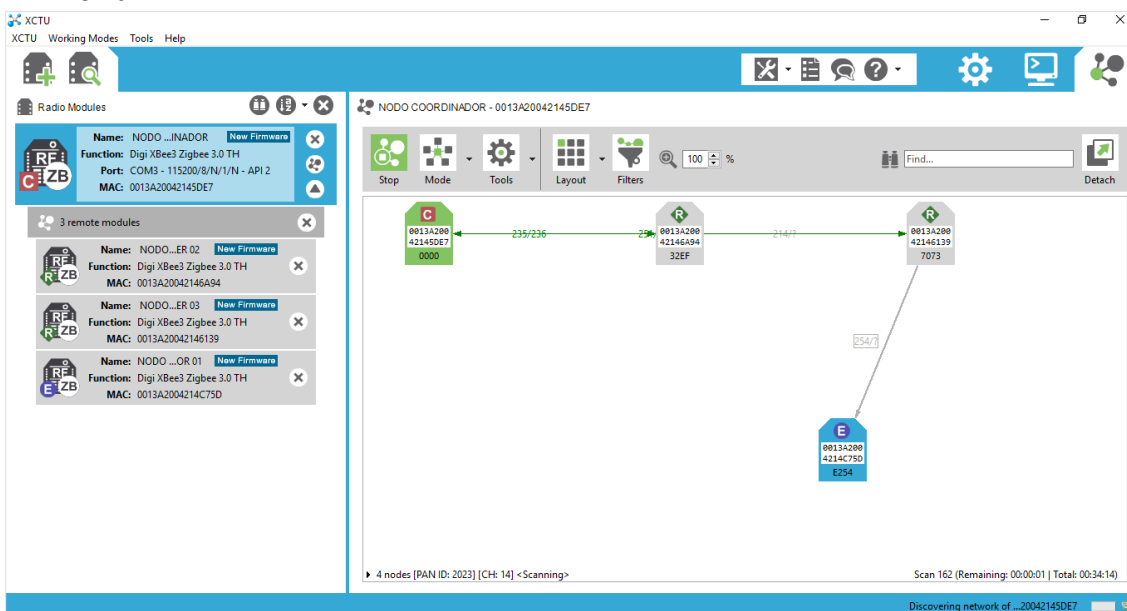
Se llevó a cabo una prueba de campo de los módulos XBee3 de Digi para determinar los valores de RSSI. Con este propósito, se estableció una conexión punto a punto entre un nodo coordinador y un nodo remoto. El nodo remoto se desplazó en tramos de 20 metros hasta alcanzar los 300 metros. Los datos medidos se presentan en la Figura 6.

**Figura 6**  
Medición de RSSI local y remoto



La distancia máxima entre nodos en el diseño propuesto no excede los 80 metros. A una distancia de 80 metros, el valor de RSSI local es de -66 dBm y el de RSSI remoto es de -65 dBm, asegurando así el rango de cobertura de los enlaces. De acuerdo con la configuración descrita, se inicializan los nodos de la red, estableciendo la conexión de la manera que se muestra en la Figura 7.

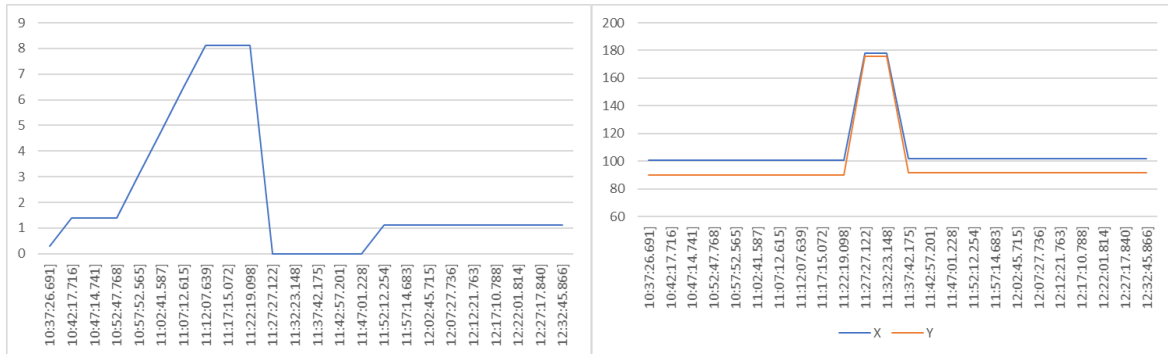
**Figura 7**  
Vista gráfica de la conexión de nodos del sistema



Para llevar a cabo las pruebas de funcionamiento, se mantuvieron encendidos todos los nodos durante dos horas con el objetivo de verificar la recepción, en el nodo central, de los datos capturados de manera remota por los sensores. Dado que las pruebas en campo no se llevaron a cabo en presencia de lluvia, fue necesario forzar el funcionamiento de los sensores de intensidad de lluvia, humedad del suelo y vibración del suelo.

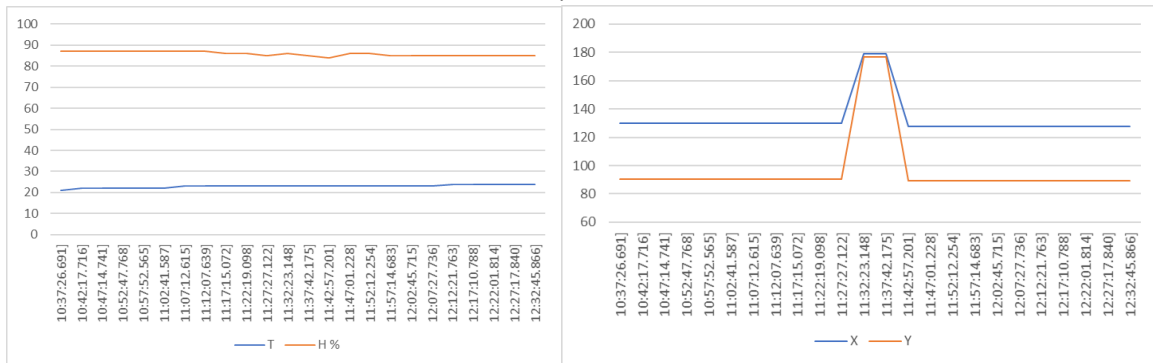
En la Figura 8 se muestran las mediciones del nodo enrutador 1. Para evaluar el funcionamiento del sensor de intensidad de lluvia, se vertieron pequeñas cantidades de agua sobre él. De manera análoga, entre las 11:22 hrs y las 11:37 hrs, se inclinó el módulo, registrándose las lecturas del acelerómetro en los ejes X e Y.

**Figura 8**  
Datos medidos en el nodo enrutador 1



A través del nodo enrutador 2 se obtuvieron las mediciones de temperatura y humedad. El valor de la temperatura se mantuvo entre 20°C y 25°C, mientras que la humedad del ambiente osciló entre el 88 % y el 85 %, como se visualiza en la Figura 9. En el nodo enrutador 3 se registraron las medidas en los ejes X e Y de un segundo acelerómetro.

**Figura 9**  
Datos medidos en los nodos enrutadores 2 y 3



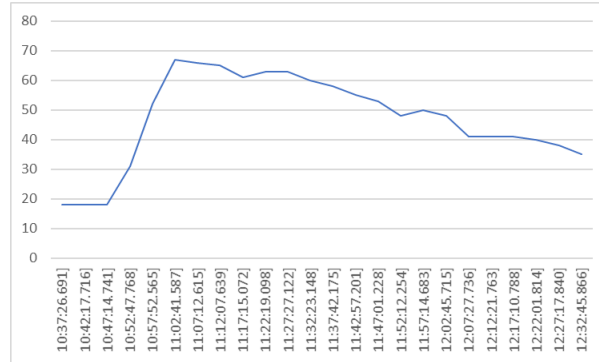
De manera similar, mediante el nodo final se registraron los valores de humedad del suelo. Como se puede observar en la Figura 10, el valor inicial fue del 18 %. A partir de ese punto, se humedeció el suelo, alcanzando una medición del 68 %, para luego comenzar a descender. Los datos proporcionados por los dos acelerómetros del sistema permitieron activar una alarma de manera remota, ubicada en la Asociación de Vivienda La Florida.

Las mediciones registradas en los nodos se monitorean de forma remota a través de la plataforma Blynk, la cual se configuró para visualizar los datos de todos los sensores del sistema, como se muestra en la Figura 11.

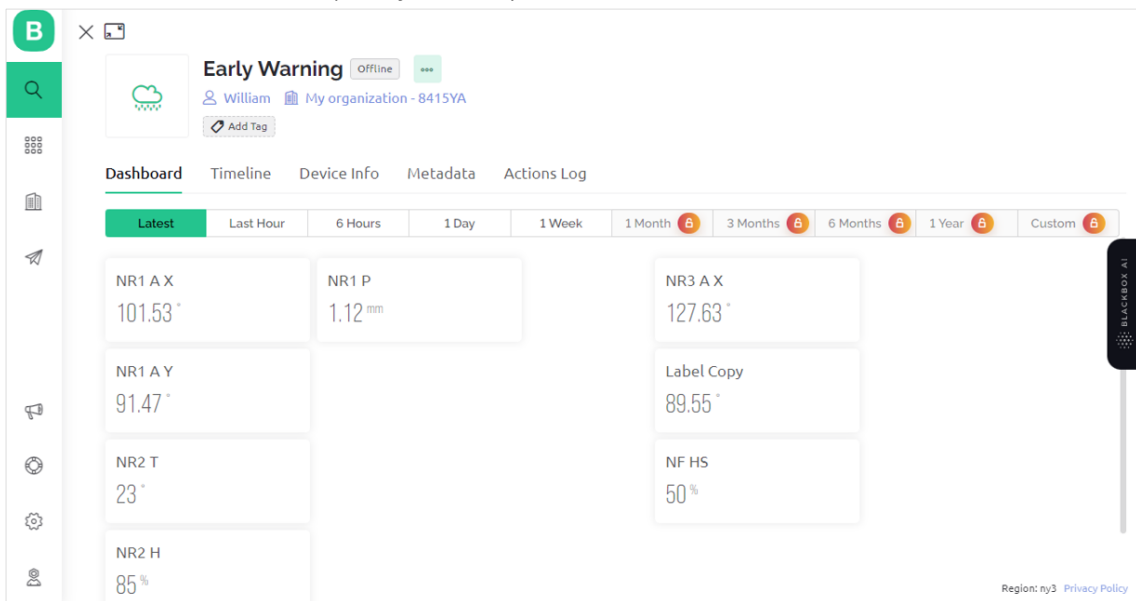
De acuerdo con la escala propuesta por Cruden & Varnes (1996), la velocidad típica de deslizamientos para eventos extremadamente rápidos es de 5 m/s. Si la cuenca analizada tiene una extensión de 6 km, según la plataforma Google Earth Pro v. 7.3.6.9345, el tiempo que

transcurriría entre la incidencia del evento y su llegada a la Asociación de Vivienda La Florida sería de 20 minutos.

**Figura 10**  
 Datos medidos en el nodo final



**Figura 11**  
 Monitoreo de valores en plataforma Blynk



## 4. Conclusiones

El estudio propone el diseño de un sistema de alerta temprana basado en una red inalámbrica de sensores ZigBee para el monitoreo de huaycos en una quebrada de Tacna, mediante mediciones de intensidad de lluvia, vibración de suelo, humedad de suelo, temperatura y humedad del ambiente. Se llevó a cabo el diseño, se verificó el funcionamiento de la red de telecomunicaciones, se mostraron los valores en la plataforma Blynk y se activó la alarma en una zona distante.

El prototipo fue evaluado en una zona específica de la Quebrada del Diablo en la ciudad de Tacna, pero puede adaptarse a cualquier quebrada que represente un peligro potencial para los habitantes de una ciudad durante épocas de lluvias intensas. De esta manera, puede

contribuir significativamente a salvar vidas. En el caso de la zona de estudio, se requieren 20 minutos para llevar a cabo una evacuación.

Por último, el prototipo implementado tiene la capacidad de replicarse a mayor escala y puede ser utilizado por instituciones gubernamentales para reducir el costo social asociado a este tipo de fenómenos naturales.

## 5. Referencias Bibliográficas

- Abdulrazzak, I. A., Bierk, H., & Aday, L. A. (2018). Humidity and temperature monitoring. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), 5174-5177. [10.14419/ijet.v7i4.23225](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.23225)
- Abraham, M. T., Satyam, N., Rosi, A., Pradhan, B., & Segoni, S. (2020). The selection of rain gauges and rainfall parameters in estimating intensity-duration thresholds for landslide occurrence: Case study from wayanad (India). *Water*, 12(4), 1000. <https://doi.org/10.3390/w12041000>
- Ahmad, Y. A., Surya Gunawan, T., Mansor, H., Hamida, B. A., Fikri Hishamudin, A., & Arifin, F. (2021). On the evaluation of DHT22 temperature sensor for IoT application. *2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)*. [10.1109/ICCCCE50029.2021.9467147](https://doi.org/10.1109/ICCCCE50029.2021.9467147)
- Balto, K. E., Yamin, M. M., Shalaginov, A., & Katt, B. (2023). Hybrid IoT cyber range. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(6), 3071. <https://doi.org/10.3390/s23063071>
- Chaudhry, A. A., Mumtaz, R., Hassan Zaidi, S. M., Tahir, M. A., & Syed Hassan Muzammil School. (2020). Internet of things (IoT) and machine learning (ML) enabled livestock monitoring. *2020 IEEE 17th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI (HONET)*. [10.1109/HONET50430.2020.9322666](https://doi.org/10.1109/HONET50430.2020.9322666)
- Cruden, D.M., & Varnes, D.J., (1996). Landslide Types and Processes, Special Report. *Transportation Research Board, National Academy of Sciences*, 247, 36-75. <https://goo.su/IHcdlfp>
- Digi. (2022). Digi XBee®3 RF Module Hardware Reference Manual <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90001543.pdf>
- Espressif Systems. (2023). *espressif.com*. <https://goo.su/g5e4fA>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Guadalupe, E., & Carrillo, N. (2012). Caracterización y análisis de los huaycos el 5 de abril del 2012 Chosica-Lima. *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 15(29), 69-82. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/RFIGMMG-29-3.pdf>
- Hakim, W. M., Ramli, A. F., Basarudin, H., Abu, M. A., & Ahmad, I. (2020). WSN and IoT based landslide monitoring system. *Test Engineering and Management*, 83, 10926-10932.
- Highland, L.M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

- [https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325\\_508.pdf](https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325_508.pdf)
- INGEMMET, 2020. *Evaluación de peligros geológicos en las quebradas del diablo y caramolle en Tacna*. <https://goo.su/pn8A>
- InvenSense Inc. (2023). *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4*. <https://goo.su/WHTN>
- Kjekstad, O., & Highland, L. (2008). Economic and social impacts of landslides. En *Landslides – Disaster Risk Reduction* (pp. 573–587). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_30)
- Li, H., Zhao, L., Darr, M. J., & Ling, P. (2009). Modeling wireless signal transmission performance path loss for ZigBee communication protocol in residential houses. *Reno, Nevada*. [10.13031/2013.27227](https://doi.org/10.13031/2013.27227)
- Ministerio de Salud (2019). *Reporte de Situación N°013– 2019 – COE Sauld – DIGERD. En RS N° 013-2019 Act. N° 15-2019 Lluvias intensas en Tacna*. <https://goo.su/ZUwj2l>
- Mahardika, F., Ghofinda Prasetia, M., Cahniya Sari, P., Azwan, M., & Inayah, I. (2023). Design and build a website-based landslide early warning system. *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, 10(1), 142–151. <https://doi.org/10.33019/jurnalecotipe.v10i1.3894>
- Medeiros, H. P. L., & Girao, G. (2020). An IoT-based air quality monitoring platform. *2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*. [10.1109/ISC251055.2020.9239070](https://doi.org/10.1109/ISC251055.2020.9239070)
- Mishra, A. (2019). Embedded development platforms to design prototypes of internet of things (IoT) applications: A study. *International Journal of Research in Advent Technology*, 7(4), 344–353. <https://doi.org/10.32622/ijrat.742019133>
- Mohammed, S. L. (2016). Distance estimation based on RSSI and Log-Normal shadowing models for ZigBee wireless sensor network. *Engineering and Technology Journal*, 34(15), 2950–2959. <https://doi.org/10.30684/etj.34.15a.15>
- Oturak, M., & Dursun, E. (2021). A cost-effective IoT based smart home application. *2021 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA) IEEE*. 1-6. [10.1109/inista52262.2021.9548468](https://doi.org/10.1109/inista52262.2021.9548468)
- Samijayani, O. N., Darwis, R., Rahmatia, S., Mujadin, A., & Astharini, D. (2020). Hybrid ZigBee and WiFi wireless sensor networks for hydroponic monitoring. *2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*. [10.1109/ICECCE49384.2020.9179342](https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179342)
- Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483–1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Sethi, P., & Sarangi, S. R. (2017). Internet of Things: Architectures, protocols, and applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017, 1–25. <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>
- Sofwan, A., Sumardi, Irsyad, M. R., & Najib. (2018). Measurement design of sensor node for landslide disaster early warning system. *2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICon EEI)*. 86-91. [10.1109/ICon-EEI.2018.8784341](https://doi.org/10.1109/ICon-EEI.2018.8784341)

- Thirugnanam, H., Uhlemann, S., Reghunadh, R., Ramesh, M. V., & Rangan, V. P. (2022). Review of landslide monitoring techniques with IoT integration opportunities. *IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 15, 5317–5338. <https://doi.org/10.1109/jstars.2022.3183684>
- Trezzini, F., Giannella, G., & Guida, T. (2013). Landslide and flood: Economic and social impacts in Italy. En *Landslide Science and Practice* (pp. 171–176). Springer Berlin Heidelberg. [10.1007/978-3-642-31313-4\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31313-4_22)
- Turner, A. K. (2018). Social and environmental impacts of landslides. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0175-y>
- Venkatesh, B., Gowda, Y., Sanjay, L., & Pavan, U. (2022). Smart Parking System Using IoT. *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, 9(3), 920-928. <https://ijrar.org/papers/IJRAR22C1478.pdf>
- Yulia, H., Pramono, S., Sutrisno, S., & Jati, B. D. (2023). IoT based early warning system of landslide and flood disasters. *AIP Conference Proceedings* 2674 (1). <https://doi.org/10.1063/5.0114101>