

Monitorización de deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano del sur del departamento del Cauca mediante IoRT

Luis Alejandro Granoble Gaviria, Cristian Camilo Granoble Gaviria, Oscar Mauricio Caicedor Rendón, Carlos Hernan Tobar Arteaga.

Departamento de Telemática - Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones - Universidad del Cauca.

Resumen—En el contexto de la monitorización de deslizamientos de tierra en zonas remotas y de difícil acceso, como el Macizo Colombiano, sur del Departamento del Cauca, se investigó la implementación de una solución IoRT que aproveche la tecnología satelital para superar las limitaciones de infraestructura y conectividad. Se diseñó e implementó un sistema integrado que combina sensores in-situ, forzando la captura de parámetros como la temperatura ambiente y humedad relativa, temperatura y humedad del suelo, y precipitaciones, junto con una estación de comunicación satelital LEO. La evaluación exhaustiva de la red de comunicaciones IoRT reveló que el modo de transmisión 3 (1-10 am) es el más eficaz para minimizar la PER en ambos escenarios, urbano y rural. Los resultados sugieren que la zona rural ofrece mejores condiciones para la transmisión de datos, y se encontró una relación compleja entre la PER y la Latencia. En conclusión, esta investigación proporciona valiosas recomendaciones para el diseño y la implementación de redes de comunicaciones IoRT para la monitorización de deslizamientos de tierra, contribuyendo significativamente al avance del estado del arte en este campo.

Index Terms—Monitorización de deslizamientos de tierra, Internet de Objetos Remotos (IoRT), Satélites LEO, Confiabilidad, Packet Error Rate (PER).

I. INTRODUCCIÓN

LA monitorización de deslizamientos de tierra es una actividad de suma importancia en zonas propensas a estos eventos naturales, como el Macizo Colombiano del sur del departamento del Cauca. La región presenta una geografía extrema que limita la instalación de infraestructura de telecomunicaciones adecuada, lo que hace necesaria la búsqueda de soluciones alternativas para la monitorización de deslizamientos de tierra [1].

En este contexto, el Internet de las Cosas Remotas (IoRT) basado en satélites de órbita terrestre baja (LEO) ofrece una solución prometedora para superar las limitaciones de conectividad en áreas de difícil acceso [2, 3]. Sin embargo, la implementación de IoRT-LEO presenta desafíos técnicos, como la variabilidad en el tiempo de visibilidad de los satélites

y la pérdida de mensajes debido a la conexión esporádica [4, 5].

El presente estudio se centra en la aplicación de IoRT-LEO para la monitorización de deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano del sur del departamento del Cauca. Se analiza la factibilidad de utilizar satélites LEO para superar la falta de redes de acceso terrestres y se identifican los desafíos técnicos asociados con la implementación de IoRT-LEO.

La monitorización de deslizamientos de tierra comprende la recolección de datos relacionados con las condiciones y características del terreno, su topografía, nivel de precipitaciones, la sismicidad y presencia de fallas geológicas, entre otras [6]. Los sensores geotécnicos y los sensores de precipitaciones juegan un papel fundamental en la monitorización de deslizamientos de tierra, ya que permiten medir fracturas en talud de roca, deformación del subsuelo, resistividad de la roca y el suelo, así como registrar periodos secos y húmedos causados por macro climas que inciden en el número de deslizamientos [7].

La implementación de IoRT-LEO para la monitorización de deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano del sur del departamento del Cauca ofrece una oportunidad para mejorar la gestión de riesgos naturales en la región. Sin embargo, es fundamental abordar los desafíos técnicos asociados con la implementación de IoRT-LEO, como la variabilidad en el tiempo de visibilidad de los satélites y la pérdida de mensajes debido a la conexión esporádica.

En este sentido, el presente estudio contribuye a la investigación en el campo de IoRT-LEO y su aplicación en la monitorización de deslizamientos de tierra. Los resultados de este estudio pueden ser utilizados para mejorar la gestión de riesgos naturales en regiones con características similares al Macizo Colombiano del sur del departamento del Cauca.

El presente artículo científico se estructura en siete secciones que abordan de manera integral el diseño, implementación y evaluación de un sistema IoRT para la monitorización de deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano. La primera sección, **Conceptos fundamentales**, proporciona una base sólida para la comprensión de los conceptos clave que se abordan en esta investigación, incluyendo IoRT, deslizamientos de tierra, monitorización de deslizamientos de tierra, satélites de órbita terrestre baja y redes IoRT basadas en LEO. La segunda sección, **Trabajos relacionados**, presenta una revisión de los trabajos previos que han abordado conceptos similares en el contexto de IoRT y transmisiones de datos satelitales. La tercera

Esta investigación se realizó en el marco del trabajo de grado titulado 'Monitorización de deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano del sur del departamento del Cauca mediante IoRT', desarrollado con el apoyo del Departamento de Telemática de la Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. Se extienden agradecimientos especiales a la Institución Educativa San Luis de Almaguer, Cauca, por su colaboración y apoyo activo en el proyecto, así como al personal administrativo que participó con disposición de calidad. Su contribución fue fundamental para el éxito de esta investigación.

sección, **Diseño del sistema IoRT para la monitorización de deslizamientos de tierra**, describe en detalle el desarrollo del sistema IoRT, incluyendo los requisitos funcionales y no funcionales, los casos de uso para actores clave y la arquitectura del sistema basada en el Modelo de Arquitectura de Referencia IoT de la ITU. La cuarta sección, **Implementación del sistema IoRT**, se enfoca en la implementación del sistema IoRT, donde se configuran los dispositivos hardware y software necesarios para su funcionamiento. La quinta sección, **Evaluación de rendimiento del sistema IoRT**, presenta la evaluación del sistema IoRT, enfocándose en el rendimiento y analizando parámetros clave como la pérdida de mensajes, la latencia, el ruido de fondo (RSSI) y la tasa de error de paquetes. La sexta sección, **Conclusiones y trabajos futuros**, sintetiza las conclusiones del proyecto, destacando los escenarios de estudio y modos de transmisión.

II. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

II-A. Deslizamientos de tierra

Un deslizamiento de tierra es el movimiento masivo de rocas, escombros, tierra o lodo por una pendiente. Si bien la mayoría de los deslizamientos de tierra son causados por la gravedad, también pueden ser causados por lluvias, terremotos, erupciones volcánicas, presión del agua subterránea, erosión, desestabilización de laderas como resultado de la deforestación, el cultivo, la construcción, y la nieve o el deshielo de los glaciares [8]. Los flujos de escombros, o de lodo, son deslizamientos de tierra de movimiento rápido que son especialmente peligrosos debido a su velocidad y volumen. Se ha registrado que algunos flujos de escombros alcanzan velocidades de más de 160 kilómetros por hora [9].

Los deslizamientos de tierra son uno de los procesos geológicos más destructivos, causando miles de muertes, e incontables pérdidas en propiedades [10]; sin embargo, el 90 % de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención y control [11]. Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia, tales como la topografía, sismicidad, meteorización (desintegración y/o descomposición del material geológico de la superficie terrestre) y lluvias intensas [12].

II-B. Monitorización de deslizamientos de tierra

Un sistema de monitorización para deslizamientos de tierra es una combinación de componentes que permiten conocer de manera periódica y en tiempo real los factores que pueden generar, en algún momento, estos eventos, y así evitar pérdidas tanto humanas como materiales [13]. Los sistemas de monitorización permiten recopilar y administrar información acerca de un posible desastre, comunicar la información de forma oportuna y eficiente a los interesados para facilitar la toma de decisiones, y alertar de forma oportuna a la población del peligro [14]. Las variables que usualmente se han utilizado para monitorizar deslizamientos de tierra son, entre otras, la lluvia, la temperatura, la sismicidad y la humedad [15].

II-C. Internet de las Cosas (IoT) e Internet de las Cosas Remotas (IoRT)

IoT hace referencia a sistemas compuestos por redes de sensores, actuadores y objetos inteligentes cuyo propósito es interconectar objetos físicos y virtuales, incluidos los objetos cotidianos e industriales, de tal manera que sean inteligentes, programables y capaces de interactuar con los humanos y entre sí [16, 17]. Por su parte, IoRT permite el despliegue de dispositivos IoT en amplias áreas geográficas, posibilitando la monitorización en las áreas más lejanas del planeta. IoRT habilitado por satélite requiere una estación de enlace terrestre para transferir los datos recopilados hacia los centros de datos a través de Internet, donde son procesados, analizados y presentados a los usuarios. IoRT hace factible la monitorización de datos en áreas lejanas o donde la infraestructura de comunicaciones convencional es escasa o inexistente [18].

II-D. Satélites de Órbita Terrestre Baja (LEO)

Los satélites LEO son componentes espaciales de sistemas de comunicaciones de amplio alcance, se encuentran entre los 600 y los 1600 km, haciendo que la latencia sea casi despreciable (centésimas de segundo) y que emitan menor potencia. Sin embargo, cubren regiones más pequeñas que los satélites GEO y por tanto es necesaria una constelación de satélites LEO para cubrir todo el planeta [19]. Su período orbital es de unos 100 minutos, necesitándose múltiples trasposos de un satélite a otro (handover). Dependiendo del ancho de banda soportado, es posible implementar servicios de telefonía móvil, transferencia de datos, posicionamiento y acceso a Internet [20].

II-E. Redes IoRT basadas en satélites LEO

IoRT-LEO constituye una solución de red para la conectividad IoT en zonas rurales, donde no hay acceso a Internet mediante tecnologías terrestres [21]. En Colombia, IoRT-LEO es de gran relevancia, ya que permite superar las dificultades de conectividad, posibilitando la implementación de sistemas de monitorización de deslizamientos de tierra. Este trabajo basa su investigación en el modem Swarm M138 [22], el cual es empleado para transmitir los datos capturados en tierra mediante sensores y la red de satélites LEO de Swarm. Swarm Space proporciona la conectividad global de menor costo para dispositivos IoT en el mercado a nivel mundial [23].

III. TRABAJOS RELACIONADOS

A continuación, se presentan los trabajos más relevantes para cada uno de los grupos identificados en la fase de inclusión de la revisión sistemática.

III-A. Arquitecturas de red para IoRT

El artículo **A Survey on Technologies, Standards and Open Challenges in Satellite IoT** [24], estudia las soluciones actuales para el despliegue de servicios de IoT en áreas remotas/rurales mediante la utilización de satélites. Se analizan varias arquitecturas, soluciones técnicas y limitaciones. Este estudio sirve como referencia para definir una arquitectura

IoRT para monitorizar deslizamientos de tierra en zonas rurales del Macizo Colombiano en el sur del departamento del Cauca considerando requisitos de interoperabilidad.

El artículo **An SDR-Based Satellite Gateway for Internet of Remote Things (IoRT) Applications** [25], desarrolla un gateway satelital para IoRT mediante radio definido por software (SDR). El uso de SDR permite disminuir el costo del equipo y proporciona una mayor flexibilidad, permitiendo la actualización en tiempo real de la configuración de protocolos. Aunque en este proyecto no se tiene planeado emplear SDR, es necesario considerar funcionalidades de coordinación de tareas para lograr una comunicación confiable.

III-B. Sensores para monitorización de deslizamientos de tierra

El artículo **Design and Development of Real-time landslide early warning system through low cost soil and rainfall sensors** [26], desarrolla un sistema de alerta temprana ante deslizamientos empleando sensores de lluvia, temperatura y humedad. Los datos recolectados se envían mediante el sistema de comunicaciones móviles GSM (Global System For Mobile Communication). Este trabajo aporta descripciones útiles sobre qué sensores se pueden emplear y sus características. Como principal diferencia, este trabajo de grado propone emplear enlaces satelitales LEO en lugar de GSM para la comunicación de datos.

El artículo **SitkaNet: A low-cost, distributed sensor network for landslide monitoring and study** [27], propone un sistema de bajo costo y fácil instalación que permite monitorear deslizamientos de tierra. Genera informes en tiempo real y predicciones de deslizamientos. Mide la intensidad de lluvia, la humedad del suelo, la presión atmosférica y la temperatura. La comunicación se hace a través de la tecnología LoRa hacia un concentrador conectado a Internet. Cada nodo está diseñado para funcionar durante más de seis meses con una batería de iones de litio. Este trabajo sirve como guía para determinar la cantidad de sensores y sus funcionalidades. Es de resaltar que el trabajo de grado propone emplear enlaces satelitales LEO como principal diferencia.

III-C. Mecanismos para gestionar la confiabilidad de la conexión entre la estación terrena y satélites LEO en monitorización remota

El artículo **Scheduling Sparse LEO Satellite Transmissions for Remote Water Level Monitoring** [28], explora el uso de satélites LEO para monitorizar niveles de agua en áreas remotas. En particular, debido al periodo de sobrevuelo de los satélites y las conexiones esporádicas con la estación terrestre, se propuso un algoritmo de programación (scheduling) para la transmisión de los datos. En el trabajo de grado propuesto, puede ser necesario programar tareas para lograr una transmisión de datos confiable, pero considerando diferentes sensores y tiempos de muestreo. No obstante, este trabajo relacionado constituye un punto de partida relevante para abordar la confiabilidad de la comunicación mediante la técnica de scheduling.

El artículo **Online green data gathering from GEO-distributed IoT networks via LEO satellites** [29], propone un algoritmo de aprendizaje online basado en optimización de Lyapunov para manejar el problema de la conexión esporádica entre estación terrena y satélites LEO. El algoritmo aprende mediante la experiencia en cada intento de transmisión de datos, y asume conocimiento perfecto de la disponibilidad del enlace uplink. Sin embargo, la disponibilidad de los enlaces puede variar y dicho supuesto no se cumple. En este trabajo de grado, se evaluará la confiabilidad en la comunicación de datos (por ejemplo, pérdida de paquetes) frente a la variación de la disponibilidad de enlaces satelitales.

Los trabajos citados plantean variedad de enfoques de arquitectura de red para sistemas IoRT [24, 25], algunos, puntualmente para monitorización de deslizamientos de tierra. Otros trabajos refieren detalladamente sensores y/o redes de sensores inalámbricos (WSN) para monitorizar deslizamientos de tierra [26, 27], pero no en el contexto de IoRT. El problema de la conexión esporádica en el enlace nodo sensor y satélites LEO fue planteado en [29][31], [28]. Los autores de [29] asumen que los enlaces son plenamente predecibles, lo cual difiere de un contexto real; y el trabajo [28] es para monitorización remota de nivel de agua, que es diferente al propósito de este proyecto, pues plantea variables a monitorizar diferentes, cada una con requisitos de tiempo de muestreo particulares.

IV. DISEÑO DEL SISTEMA IORT PARA MONITORIZACIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA

Esta sección detalla el desarrollo integral del sistema IoRT para monitorizar deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano, especificando requisitos funcionales y no funcionales, casos de uso para actores clave (Coordinador de Gestión de Riesgo, Alcalde de Almaguer, Comité de la Institución Educativa San Luis y Técnico de Monitorización), y modelos de dominio, comportamiento y datos. Definiendo la arquitectura del sistema que se basa en el Modelo de Arquitectura de Referencia IoT de la ITU, garantizando una estructura coherente y eficiente. Se abordan aspectos críticos como bajo consumo de potencia, conectividad efectiva, procesamiento de datos y escalabilidad. La implementación incluye configuración de la red IoRT, protocolos de comunicación, servicios en la nube y procesamiento de datos para visualización, proporcionando una visión completa de los elementos técnicos involucrados en el desarrollo del sistema, asegurando una base sólida para la monitorización efectiva de deslizamientos de tierra.

IV-A. Requisitos funcionales del sistema IoRT

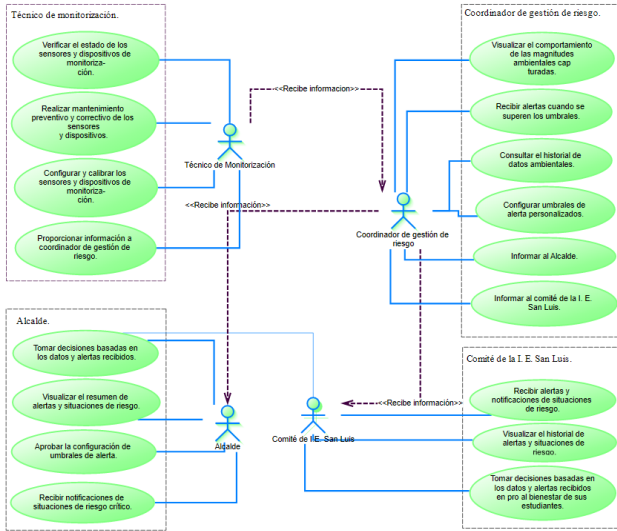


Figura 1: Diagrama de casos de uso del sistema IoRT para monitorización de deslizamientos de tierra.

La gráfica de actores y casos de uso ilustra la interconexión entre los diferentes actores involucrados en el sistema de monitorización de deslizamientos de tierra en Almaguer. En este esquema, el **Coordinador de Gestión de Riesgo** juega un papel central, recibiendo información crítica del **Técnico de Monitorización** sobre los niveles de riesgo y alertas generadas por el sistema. A partir de esta información, el Coordinador de Gestión de Riesgo analiza y procesa los datos para emitir alertas y notificaciones precisas. Estas notificaciones son enviadas al **Alcalde de Almaguer** y al **Comité de la Institución Educativa San Luis**, quienes, a su vez, toman decisiones informadas basadas en los datos y alertas recibidas. Este caso de uso compartido entre el Alcalde y el Comité de la Institución Educativa San Luis es fundamental para garantizar la seguridad y el bienestar de la comunidad, especialmente en situaciones de emergencia. Además, el Alcalde coordina respuestas de emergencia, mientras que el Comité de la Institución Educativa San Luis implementa medidas de seguridad específicas para los estudiantes. La gráfica también resalta la importancia de la colaboración y el flujo de información entre los actores, asegurando una respuesta rápida y efectiva ante posibles deslizamientos de tierra.

IV-B. Requisitos no funcionales del sistema IoRT

Los requisitos no funcionales del sistema IoRT para monitorización de deslizamientos de tierra se centran en garantizar la eficiencia, confiabilidad y escalabilidad del sistema. En cuanto al **consumo de energía**, es fundamental asegurar la autonomía energética del sistema, considerando factores como la generación de energía renovable, eficiencia energética, almacenamiento de energía y gestión de consumo. La **comunicación** efectiva entre dispositivos es crucial, y se divide en tres etapas clave: la conexión entre sensores y ESP32, la comunicación entre ESP32 y el kit de evaluación de Swarm, y

la comunicación satelital entre el kit de evaluación de Swarm y Swarm Hive. Además, se requiere un **bajo consumo de potencia** para garantizar el funcionamiento prolongado del sistema, así como una **gestión del consumo energético** eficiente. La **conectividad efectiva** y el **procesamiento efectivo de los datos** son también fundamentales, al igual que la **gestión de almacenamiento** y la **adaptación del sistema** a entornos con condiciones atmosféricas difíciles. Finalmente, la **escalabilidad** del sistema es esencial para adaptarse a las necesidades de cada usuario.

IV-C. Modelo de dominio del sistema

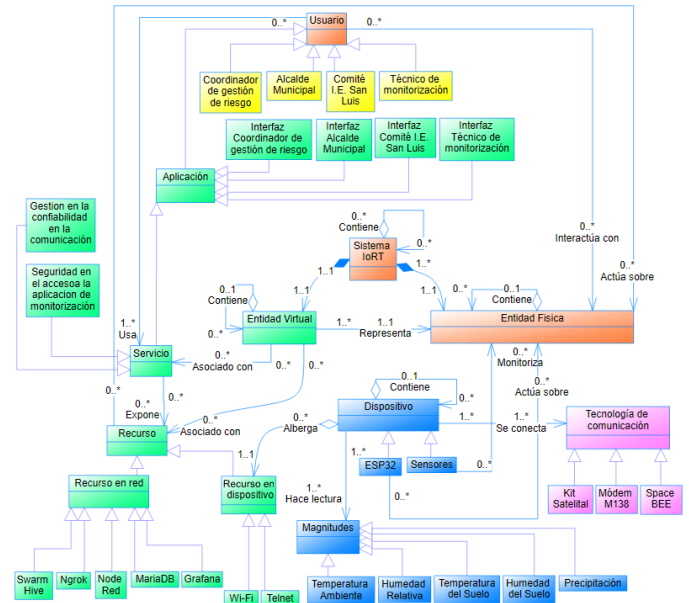


Figura 2: Modelo de dominio del sistema IoRT para monitorización de deslizamientos de tierra.

El modelo de dominio del sistema IoRT 2 presenta una arquitectura híbrida que integra entidades físicas y virtuales, permitiendo la monitorización eficaz de magnitudes ambientales y la toma de decisiones informadas. La infraestructura de monitorización se compone de dispositivos IoRT conectados a múltiples redes de comunicación, incluyendo Wi-Fi (Telnet), que transmiten paquetes de datos a bases de datos especializadas, como Swarm Hive y MariaDB.

La gestión de la confiabilidad de la comunicación garantiza la integridad y consistencia de los datos, mientras que la autenticación y autorización de usuarios y la seguridad de acceso a la aplicación de monitorización por roles aseguran la seguridad y control de acceso. La configuración y soporte técnico de la estación sensora están reservados para un técnico de monitorización autorizado, lo que garantiza la eficiencia y productividad del sistema. Este enfoque permite una monitorización eficaz y una toma de decisiones informadas, mejorando la eficiencia y productividad en la gestión de los recursos ambientales.

IV-D. Modelo de comportamiento del sistema

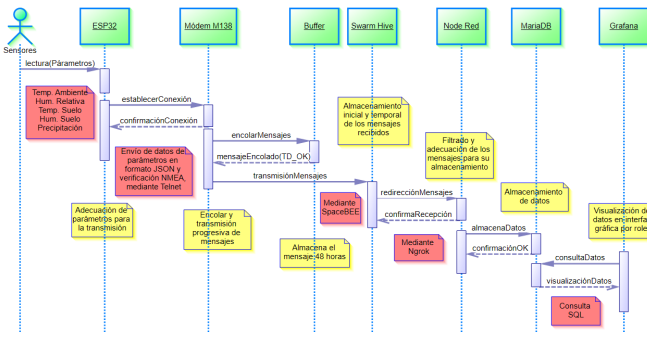


Figura 3: Diagrama de secuencia general - Sistema IoRT.

El diagrama de secuencia representado en la figura 3 ilustra el comportamiento del sistema IoRT, iniciando con la lectura de magnitudes por parte de los sensores quienes envían datos a la placa Esp32 (ESP32-WROVER-E) mediante comunicación inalámbrica/física (WiFi). La ESP32 establece una conexión Telnet con el módem M138, transmitiendo los datos en formato JSON y con verificación NMEA, almacenándolos en una cola de mensajes para su transmisión paulatina. Posteriormente, el módem M138 utiliza el sistema satelital SpaceBEE para enviar los mensajes a Swarm Hive, que a su vez redirige la información a Node Red mediante Ngrok. Node Red procesa los paquetes y los almacena en la base de datos MariaDB. Finalmente, MariaDB proporciona los datos a Grafana para su visualización en forma de gráficos y tablas, permitiendo la monitorización y análisis de los datos recopilados por los sensores. Este diagrama de secuencia detalla la secuencia de eventos y la interconexión entre los componentes del sistema IoRT, desde la adquisición de datos hasta su visualización, garantizando una arquitectura escalable y segura para la recolección y análisis de datos en tiempo real.

IV-E. Modelo de datos del sistema

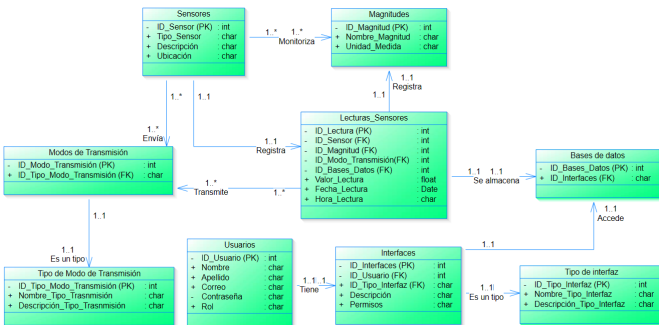


Figura 4: Modelo Entidad - Relación del Sistema IoRT del monitorización de deslizamientos de Tierra

El MER ilustrado en la figura 4 se compone de 7 tablas interconectadas: **Usuarios**, **Interfaces**, **Lecturas_Sensores**, **Bases de datos**, **Sensores**, **Modos de transmisión** y **Magnitudes**.

Los Usuarios interactúan con el sistema a través de Interfaces, mientras que los Sensores recopilan datos de Magnitudes y los envían mediante Modos de transmisión. Los datos se almacenan en Bases de datos y se proporcionan a Interfaces para visualización. El sistema analiza los datos y envía alertas a los Usuarios en caso de deslizamientos detectados. Este sistema garantiza una monitorización eficiente y oportuna de deslizamientos de tierra, permitiendo una respuesta rápida y efectiva ante emergencias, mejorando la respuesta ante posibles emergencias, reduciendo el riesgo de daños a personas y propiedades, optimizando la gestión de recursos y garantizando la seguridad y bienestar de la comunidad.

IV-F. Arquitectura del sistema

En esta sección se presenta el diagrama de la solución IoRT para monitorizar deslizamientos de tierra adoptada y representada en la figura 5. Esta se basa en el modelo arquitectural de referencia de IoT de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) [30].

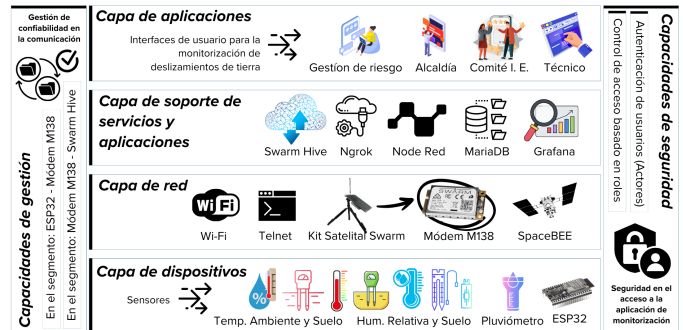


Figura 5: Diagrama de la solución IoRT para deslizamientos de tierra con base a Arquitectura de referencia de IoT de la UIT

La solución IoRT se estructura en cuatro capas fundamentales: Capa de Dispositivo, Capa de Red, Capa de Soporte de Servicio y Aplicación, y Capa de Aplicación. Además, se integran dos capacidades transversales que atraviesan las cuatro capas, proporcionando funcionalidades de Gestión y Seguridad avanzadas, garantizando la interoperabilidad, escalabilidad y confiabilidad del sistema. Estas capas y capacidades transversales permiten una integración eficiente de tecnologías IoRT, asegurando la eficacia y eficiencia en la gestión la red, abarcando desde la integración de sensores y dispositivos hasta la interfaz de usuario inicial y la seguridad de acceso a las aplicaciones.

IV-F1. Capa de dispositivo

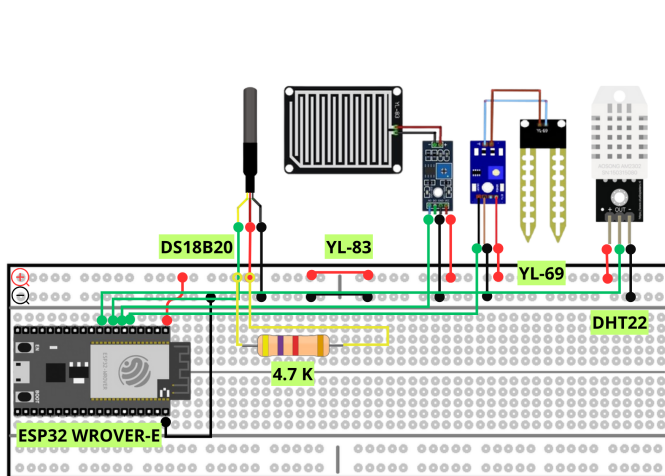


Figura 6: Esquema circuitual - Red IoRT-LEO para la monitorización de deslizamientos de tierra.

La capa de dispositivo del sistema IoRT para monitorización de deslizamientos de tierra se diseñó con sensores específicos para medir temperatura y humedad ambiente, temperatura y humedad del suelo, y precipitación ilustrados en la figura 6. La selección de sensores se basó en el análisis AHP y se consideraron aspectos técnicos críticos para garantizar la precisión y eficacia en la monitorización de magnitudes ambientales en el Macizo Colombiano. La calibración y validación periódica de los sensores, así como el mantenimiento regular por parte del técnico de monitorización, son fundamentales para garantizar la precisión y confiabilidad del sistema. La implementación de la estación sensora en la Institución Educativa San Luis, Sede Casa Blanca de Almaguer, Cauca, beneficiará directamente a la comunidad educativa, proporcionándoles una capa adicional de protección y seguridad frente a posibles deslizamientos de tierra.

IV-F2. Capa de red

La capa de red del sistema IoRT emplea una arquitectura de comunicación avanzada basada en protocolos estándar, garantizando una conexión segura y confiable entre los componentes del sistema. La infraestructura de Swarm Space utiliza WiFi y el protocolo TELNET para establecer una comunicación inalámbrica entre la ESP32 y el Modem Satelital M138, que transmite los datos a Swarm Hive a través de la red de satélites SpaceBEE. La adquisición de Swarm Space por parte de SpaceX expande las capacidades de networking, ofreciendo soluciones de comunicación satelital para IoT y aplicaciones de monitorización remota, con mejores valores de latencias y velocidades. La constelación SpaceX proporciona cobertura global y segura para la transmisión de datos, permitiendo aplicaciones como IoT, telecomunicaciones móviles y servicios de emergencia.

IV-F3. Capa de soporte de servicios y aplicaciones



Figura 7: Flujo de de servicios y aplicaciones adoptado para la solución IoRT.

La plataforma de Swarm Space emplea una arquitectura de capas para el procesamiento y análisis de datos recopilados por sensores IoRT. La Capa de Soporte de Servicios y Aplicaciones ofrece servicios especializados para la gestión, procesamiento y análisis de los datos, garantizando su integridad, precisión y relevancia. Los datos se reciben en Swarm Hive en formato JSON, luego se almacenan temporalmente y se someten a comprobaciones de consistencia y validación de datos. Posteriormente, se procesan utilizando algoritmos y técnicas avanzadas de análisis y procesamiento de datos, empleando herramientas como Ngrok y Node-RED. Los datos procesados se almacenan en MariaDB y se visualizan en Grafana, asegurando la eficiencia y eficacia en el procesamiento, almacenamiento y visualización de los datos.

IV-F4. Capa de aplicaciones

En la **Capa de Aplicación**, Grafana desempeña un papel fundamental al crear una interfaz de visualización intuitiva y personalizable, diseñada específicamente para cada rol dentro del sistema. Se han implementado dashboards y reportes personalizados para perfiles clave: **Coordinador de Gestión de Riesgo, Alcalde Municipal, Comité de la Institución Educativa San Luis de Almaguer y Técnico de Monitorización**. Estas visualizaciones permiten a los usuarios finales analizar y explotar los datos de manera efectiva, tomar decisiones informadas y monitorizar los datos en tiempo real. La seguridad y acceso controlado se garantizan mediante la implementación de un modelo de acceso basado en roles, restringiendo el acceso a los servicios y funcionalidades de la interfaz según el perfil y permisos asignados a cada actor.

IV-F5. Capacidades transversales

El sistema IoRT para deslizamientos de tierra presenta capacidades de gestión y seguridad avanzadas. En cuanto a la **gestión**, se implementaron algoritmos y configuraciones especializados para garantizar la integridad y precisión de los datos transmitidos, minimizando la pérdida de información y asegurando la precisión en la detección y monitorización de deslizamientos de tierra. En cuanto a la **seguridad**, se incorporó un esquema de autenticación de usuarios y control de acceso basado en roles, restringiendo el acceso a funcionalidades críticas y minimizando el riesgo de accesos no autorizados y vulneraciones de seguridad. Estas capacidades garantizan la confiabilidad, eficiencia y seguridad del sistema IoRT, esencial para la toma de decisiones informadas en aplicaciones IoRT.

V. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA IORT

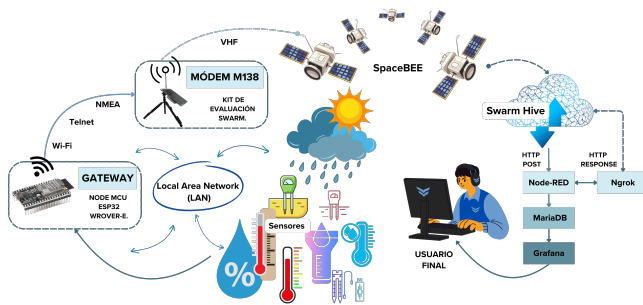


Figura 8: Red IoRT-LEO para la monitorización de deslizamientos de tierra.

El sistema IoRT para monitorización de deslizamientos de tierra ilustrado en la figura 8 se diseñó como una solución autónoma y confiable, integrando sensores de temperatura, humedad y precipitación conectados a la tarjeta microcontroladora ESP32. La comunicación inalámbrica se estableció mediante el protocolo Telnet y Wi-Fi, utilizando tecnologías de red inalámbrica. La programación de la ESP32 se realizó utilizando C++ y Arduino IDE. Los datos se transmitieron en formato JSON y con verificación NMEA al módem M138, que los transmitió sistemáticamente mediante el sistema satelital a Swarm Hive. La transmisión se realizó en la banda de frecuencia VHF, utilizando la modulación GMSK y la tecnología de acceso múltiple por división de código (CDMA), servicio ofrecido por las capacidades de networking de Swarm Technologies. Los datos se procesaron y analizaron en tiempo real utilizando Node-RED, MariaDB y Grafana, permitiendo la monitorización de variables críticas y el análisis posterior de los datos. Este sistema garantiza una respuesta rápida y efectiva en caso de emergencia, demostrando su eficacia y confiabilidad en la monitorización de deslizamientos de tierra.

VI. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DEL SISTEMA IORT

La evaluación del rendimiento del sistema IoRT para la monitorización de deslizamientos de tierra se realizó en dos escenarios contrastantes: uno rural y otro urbano. Específicamente, el contexto rural fue el foco principal del diseño del prototipo, considerando zonas de difícil acceso con ausencia de cobertura de redes convencionales y única conectividad mediante la red satelital Swarm, facilitada por el módem M138.

Escenario Rural: El escenario rural se caracterizó por una zona de difícil acceso, sin cobertura de redes convencionales, y donde la única conexión disponible era la red satelital proporcionada por Swarm mediante el módem M138. En este contexto, se diseñaron tres modos de transmisión para evaluar el rendimiento del sistema:

(Modo 1) - Modo de transmisión 24/7 : Transmisión continua las 24 horas del día, los 7 días de la semana.

(Modo 2) - Modo de transmisión en una ventana satelital: Transmisión en un rango determinado de tiempo (2-3 a.m.), coincidiendo con el paso de una ventana de satélites por la región.

(Modo 3) - Modo de transmisión en dos ventanas satelitales: Transmisión en un rango determinados de tiempo (1-10 a.m.), aprovechando múltiples pasos de satélites en dos ventanas satelitales. Esto en horas de la mañana.

Estos modos de transmisión se programaron para evaluar su eficiencia y confiabilidad en términos de **perdida de mensajes, latencia, ruido de fondo (RSSI) y tasa de error de mensajes**.

Escenario Urbano: Para realizar un análisis exhaustivo y obtener comparativas, los mismos tres experimentos se replicaron en un contexto urbano, específicamente en la ciudad de Popayán, Colombia. Este enfoque permitió evaluar la influencia del entorno urbano en el rendimiento del sistema IoRT.

VI-A. Evaluación de rendimiento del sistema IoRT en relación a la pérdida de mensajes

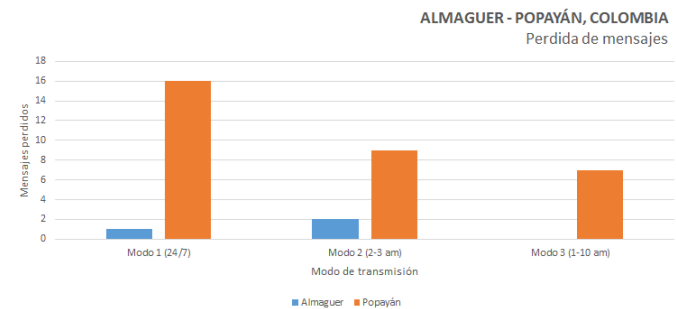


Figura 9: Pérdida de mensajes en escenarios de transmisión 1, 2 y 3.

Análisis de resultados en relación a la pérdida de mensajes.

La gráfica de barras ilustrada en la figura 9 presenta una evaluación del rendimiento del sistema IoRT para monitorización de deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano, en relación a la pérdida de mensajes en dos escenarios de estudio: Almaguer (zona rural) y Popayán (zona urbana). La gráfica compara tres modos de transmisión: continuo (24/7), con una ventana satelital (2-3 am) y con dos ventanas satelitales (1-10 am).

Almaguer (Zona Rural):

- **Modo 1 (24/7):** 1 mensaje perdido de 24 (4.17 %).
- **Modo 2 (2-3 am):** 2 mensajes perdidos de 13 (15.38 %).
- **Modo 3 (1-10 am):** 0 mensajes perdidos de 13 (0 %).

Popayán (Zona Urbana):

- **Modo 1 (24/7):** 16 mensajes perdidos de 24 (66.67 %).
- **Modo 2 (2-3 am):** 9 mensajes perdidos de 13 (69.23 %).
- **Modo 3 (1-10 am):** 7 mensajes perdidos de 13 (53.85 %).

Comparativa entre escenarios:

- **En el modo 1 (24/7),** la zona urbana (Popayán) presenta una tasa de pérdida de mensajes significativamente mayor

(66.67 %) en comparación con la zona rural (Almaguer) (4.17 %).

- **En el modo 2 (2-3 am)**, la zona urbana (Popayán) presenta una tasa de pérdida de mensajes ligeramente mayor (69.23 %) en comparación con la zona rural (Almaguer) (15.38 %).
- **En el modo 3 (1-10 am)**, la zona urbana (Popayán) presenta una tasa de pérdida de mensajes significativamente mayor (53.85 %) en comparación con la zona rural (Almaguer) (0 %).

Comparativa entre modos de transmisión:

- **En la zona rural (Almaguer)**, el modo 3 (1-10 am) presenta la menor tasa de pérdida de mensajes (0 %), seguido del modo 1 (24/7) (4.17 %) y luego el modo 2 (2-3 am) (15.38 %).
- **En la zona urbana (Popayán)**, el modo 3 (1-10 am) presenta la menor tasa de pérdida de mensajes (53.85 %), seguido del modo 2 (2-3 am) (69.23 %) y luego el modo 1 (24/7) (66.67 %).

Recomendaciones:

Utilizar el modo 3 (1-10 am) para minimizar la pérdida de mensajes en zonas rurales y urbanas.

VI-B. Evaluación de rendimiento del sistema IoRT en relación a la latencia

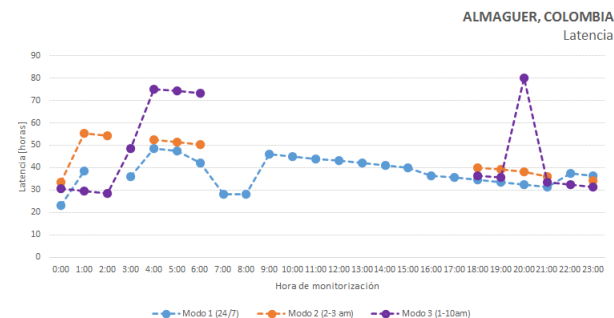


Figura 10: Latencia promedio - Almaguer.

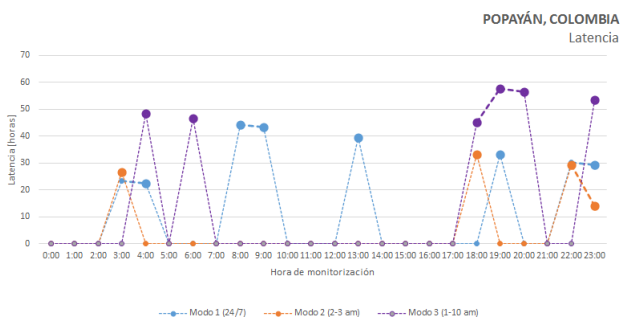


Figura 11: Latencia promedio - Popayán.

Análisis de resultados en relación a la latencia.

Las gráficas 10 y 11 presentan una evaluación del rendimiento del sistema IoRT para monitorización de deslizamientos de

tierra en el Macizo Colombiano, en relación a la latencia, esto en dos escenarios de estudio: Almaguer (zona rural) y Popayán (zona urbana). La gráfica compara tres modos de transmisión: continuo (24/7), con una ventana satelital (2-3 am) y con dos ventanas satelitales (1-10 am).

Modo 1 (24/7)

- **Almaguer:** Latencia promedio 37,87 horas (rango 23-48 horas)
- **Popayán:** Latencia promedio 33,22 horas (rango 23-29 horas)

Modo 2 (2-3 am)

- **Almaguer:** Latencia promedio 44,09 horas (rango 33-55 horas)
- **Popayán:** Latencia promedio 25,82 horas (rango 14-29 horas)

Modo 3 (1-10 am)

- **Almaguer:** Latencia promedio 46,87 horas (rango 28-75 horas)
- **Popayán:** Latencia promedio 51,31 horas (rango 45-57 horas)

Comparativa entre escenarios:

En general, se observa que la latencia en Popayán presenta valores inferiores en comparación con la zona rural, atribuible a la variabilidad en los niveles RSSI y la eficiente gestión de tráfico de mensajes. La inestabilidad en los valores de RSSI reduce la acumulación de mensajes en el buffer, minimizando la congestión y optimizando el rendimiento del sistema.

En contraste, la zona rural (Almaguer) presenta valores de latencia superiores, pero con una mayor estabilidad por cada modo de transmisión. Esto se debe a la consistencia en los niveles de RSSI y la gestión eficiente de tráfico de mensajes. Sin embargo, la estabilidad de RSSI genera una mayor acumulación de mensajes en el buffer, aumentando la congestión y la latencia. Además, cualquier fluctuación inesperada en los valores de RSSI puede causar reordenamientos en la cola de mensajes, provocando retrasos en la transmisión y aumentando la latencia de mensajes específicos.

Comparativa entre modos de transmisión:

- En Almaguer, el modo 1 (24/7) presenta la menor latencia promedio (37,87 horas).
- En Popayán, el modo 2 (2-3) presenta la menor latencia promedio (25,82 horas).

Recomendaciones:

- Utilizar el modo 3 para minimizar la latencia en ambos escenarios.
- Implementar técnicas de optimización de red para reducir la congestión y la interferencia en ambos escenarios.

VI-C. Evaluación de rendimiento del sistema IoRT en relación al ruido de fondo (RSSI)

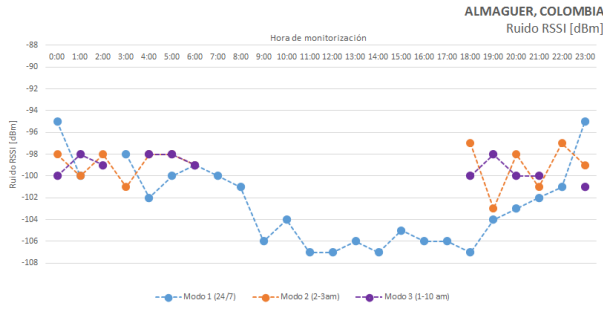


Figura 12: Ruido RSSI en escenarios de transmisión modo 1, 2 y 3 - Almaguer

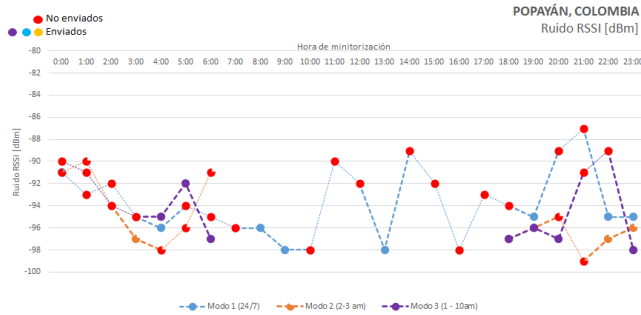


Figura 13: Ruido RSSI en escenarios de transmisión modo 1, 2 y 3 - Popayán

Análisis de resultados en relación al ruido de fondo RSSI.

Las gráficas 12 y 13 presentan una evaluación del rendimiento del sistema IoRT para monitorización de deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano, en relación al ruido de fondo RSSI en dos escenarios de estudio: **Almaguer** (zona rural) y **Popayán** (zona urbana). Las gráficas compara tres modos de transmisión: continuo (24/7), con una ventana satelital (2-3 am) y con dos ventanas satelitales (1-10 am).

Modo 1 (24/7)

- **Almaguer:** Valores de RSSI promedio -102,6 dBm (rango -95 a -107 dBm)
- **Popayán:** Valores de RSSI promedio -96 dBm (rango -95 a -98 dBm)

Modo 2 (2-3 am)

- **Almaguer:** Valores de RSSI promedio -99 dBm (rango -97 a -101 dBm)
- **Popayán:** Valores de RSSI promedio -96,75 dBm (rango -96 a -97 dBm)

Modo 3 (1-10 am)

- **Almaguer:** Valores de RSSI promedio -99,18 dBm (rango -98 a -101 dBm)
- **Popayán:** Valores de RSSI promedio -96,6 dBm (rango -95 a -98 dBm)

Comparativa entre escenarios:

En general, los valores de RSSI en Almaguer son mejores que en Popayán en todos los modos de transmisión.

Comparativa entre modos de transmisión:

- En Almaguer, el modo 1 presenta los mejores valores de RSSI promedio (-102,6 dBm).
- En Popayán, el modo 2 presenta los mejores valores de RSSI promedio (-96,75 dBm).

Recomendaciones:

Utilizar el modo 1 para minimizar la interferencia y mejorar la calidad de la señal en ambos escenarios.

VI-D. Evaluación de rendimiento del sistema IoRT en relación a la tasa de error de paquetes

El Packet Error Rate (PER) es una medida crucial de la calidad de una transmisión de datos, que indica la proporción de paquetes recibidos con errores respecto al total de paquetes transmitidos. Esta métrica es fundamental para evaluar la confiabilidad y eficiencia de las redes de comunicaciones. Para calcular el PER, se utiliza la siguiente fórmula:

$$PER(\%) = \frac{N_{paquetesrecibidosconerrores}}{N_{totaldepaquetestransmitidos}} \times 100 \quad (1)$$

Estos valores de PER se expresan como porcentaje de paquetes recibidos con errores respecto al total de paquetes transmitidos. Sin embargo, es importante destacar que los umbrales de confiabilidad para PER varían según la aplicación y el estándar utilizado. Por ejemplo, en redes Wi-Fi [31], se considera que un PER <0,01 % es muy confiable, mientras que en redes LTE [32], un PER <1 % es confiable. Así como en sistemas satelitales un PER <1 % es muy confiable debido a la mayor latencia y el error inherente en la transmisión satelital [33].

En general, se aceptan los siguientes rangos de confiabilidad para PER en una transmisión satelital:

Cuadro I: Umbrales comunes para PER en una transmisión satelital.

Umbral	Confiabilidad de transmisión
PER <1 %	Transmisión muy confiable
1 % <PER <5 %	Transmisión confiable
5 % <PER <10 %	Transmisión moderadamente confiable
PER >10 %	Transmisión no confiable

Por tanto, en el experimento realizado para la transmisión datos en los dos escenarios planteados y para cada modo de transmisión, la PER se comportó de la siguiente manera:

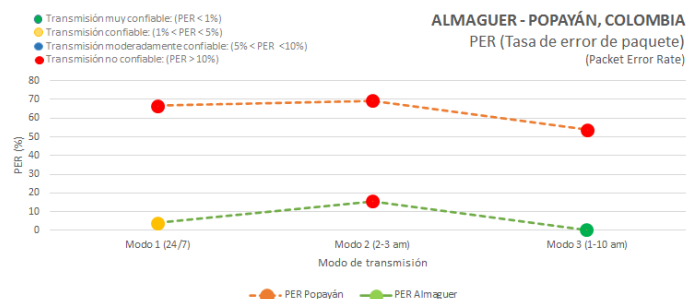


Figura 14: Packet Error Rate - Almaguer - Popayán.

Análisis de resultados en relación a la PER.

La evaluación del rendimiento del sistema IoRT para monitorización de deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano, sur del departamento del Cauca, Colombia ilustrada en la figura 14, revela resultados significativos en relación a la Tasa de Error de Paquetes (PER). Los resultados muestran que el escenario de Almaguer (zona rural) presenta mejores resultados que el escenario de Popayán (zona urbana) en todos los modos de transmisión.

Modo 1 (24/7)

- **Almaguer:** 4,166 % de PER
- **Popayán:** 66,666 % de PER

Este resultado sugiere que la transmisión continua (24/7) en Almaguer es más confiable que en Popayán, se cataloga como una **Transmisión confiable**, lo que se debe a la menor densidad de población y la menor cantidad de fuentes de interferencia electromagnética en zonas rurales.

Modo 2 (2-3 am)

- **Almaguer:** 15,384 % de PER
- **Popayán:** 69,23 % de PER

Este resultado sugiere que la transmisión con ventana satelital de 2 a 3 am, Almaguer también tiene mejores resultados que en Popayán, sin embargo esta transmisión se cataloga como **Transmisión no confiable**.

Modo 3 (1-10 am)

- **Almaguer:** 0 % de PER
- **Popayán:** 53,846 % de PER

De la misma manera, este resultado también indica que el modo de transmisión con dos ventanas satelitales de 1 a 10 am es más efectiva en Almaguer que en Popayán, esta se cataloga como **Transmisión muy confiable**. Por lo que se debe a la menor congestión de la red y la menor cantidad de obstáculos físicos en zonas rurales. Y en general, la hora es un factor crítico para definir un buen escenario en pro a la fiabilidad en la transmisión.

Comparativa entre escenarios:

La comparativa entre los resultados de Almaguer y Popayán muestra que Almaguer presenta una menor tasa de error de paquetes (PER) en todos los modos de transmisión. Esto sugiere que la zona rural de Almaguer ofrece condiciones más favorables para la transmisión de mensajes mediante un sistema IoRT, en comparación con la zona urbana de Popayán.

Comparativa entre modos de transmisión:

La comparativa entre los modos de transmisión muestra que:

- El modo 3 (1-10 am) presenta la menor PER en Almaguer (0%) y una PER significativamente menor en Popayán (53,846 %) en comparación con los otros modos.
- El modo 1 (24/7) presenta una PER moderada en Almaguer (4,166 %) y una PER alta en Popayán (66,666 %).
- El modo 2 (2-3 am) presenta una PER alta en Popayán (69,23 %) y una PER moderada en Almaguer (15,384 %).

Estos resultados sugieren que el modo de transmisión 3 es el más efectivo para minimizar la PER en ambos escenarios.

Análisis de resultados:

- La alta PER en Popayán se debe probablemente a la interferencia electromagnética y la congestión de la red en la zona urbana.
- La baja PER en Almaguer se debe probablemente a la menor densidad de población y la menor cantidad de fuentes de interferencia electromagnética en la zona rural.
- El modo 3 es el más efectivo para minimizar la PER.

Recomendaciones:

- Se sugiere utilizar el modo 3 para minimizar la PER en ambos escenarios.
- Se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar la efectividad de otros modos de transmisión y configuraciones de red.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

VII-A. Conclusiones

Optimización del modo de transmisión y selección del escenario adecuado. La optimización del modo de transmisión y la selección del escenario adecuado son fundamentales para mejorar la fiabilidad y eficiencia de la red de comunicaciones IoRT para la monitorización de deslizamientos de tierra. Los resultados obtenidos demostraron que el modo de transmisión 3 es el más efectivo para minimizar la PER en cualquiera de los escenarios, y que la zona rural es el escenario más adecuado para la implementación de sistemas de monitorización. Esto se debe a que la zona rural presentó mejores valores de RSSI para realizar transmisiones en todos los modos de transmisión analizados.

Importancia de la evaluación cuidadosa de la relación entre la PER y la Latencia. La relación entre la PER y la latencia es compleja y requiere una evaluación cuidadosa en el diseño y la implementación de redes de comunicaciones IoRT para la monitorización de deslizamientos de tierra. Aunque el modo de transmisión 3 presentó los mejores resultados en términos de PER, no necesariamente presentó los mejores resultados en términos de latencia. Esto sugiere que la relación entre la PER y la latencia es compleja y requiere una evaluación cuidadosa para garantizar la eficiencia y fiabilidad de la red.

La implementación de IoRT para deslizamientos de tierra. La implementación de IoRT para deslizamientos de tierra es un desafío técnico y logístico que requiere una evaluación cuidadosa y una optimización integral. La evaluación exhaustiva de la red de comunicaciones IoRT y la identificación de los factores críticos que afectan su desempeño permiten optimizar

el diseño y la implementación del sistema de monitorización. Esto contribuye significativamente al avance del estado del arte en este campo y sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en esta área.

Lecciones aprendidas y retos superados. El proceso de investigación para el desarrollo de un sistema de monitorización de deslizamientos de tierra en el Macizo Colombiano fue un desafío complejo que requirió la superación de numerosos obstáculos técnicos, logísticos y metodológicos. Sin embargo, a través de un enfoque sistemático y riguroso, se lograron superar estos retos y se obtuvieron resultados significativos. La identificación de los retos y la búsqueda de soluciones innovadoras permitieron adaptar y ajustar el enfoque metodológico y la estrategia de investigación para abordarlos de manera efectiva.

VII-B. Trabajos futuros

El presente estudio sentó las bases para futuras investigaciones orientadas a mejorar la fiabilidad y eficiencia de las redes de comunicaciones IoRT para la monitorización de deslizamientos de tierra. Se identificaron tres líneas de trabajo futuro: alta prioridad, interés estratégico y mejora continua.

En primer lugar, se propone evaluar exhaustivamente la eficiencia energética de los modos de transmisión, implementar técnicas de codificación y compresión de datos, y desarrollar un modelo de predicción de la Tasa de Error de Paquetes (PER). Esto permitirá mejorar la fiabilidad y eficiencia de las redes IoRT.

En segundo lugar, se sugiere evaluar la efectividad de los modos de transmisión en diferentes escenarios climáticos y áreas urbanas con alta densidad de población. Además, se propone analizar la latencia en función de la cantidad de mensajes transmitidos y densidad de población.

Finalmente, se recomienda evaluar la efectividad de los modos de transmisión en áreas rurales con baja y alta densidad de población, analizar la relación entre la PER y la latencia en diferentes escenarios, y desarrollar un protocolo de comunicación para la transmisión de datos en redes IoRT.

REFERENCIAS

- [1] E. Rubio and C. Chamorro, "Artropofauna asociada a suelos de bosques altoandinos del macizo colombiano soil arthropods from high altitude forest in macizo colombiano," *sventomologia.org*, vol. 36, no. 1, pp. 16–26, 2021.
- [2] V. Henao, Y. Garcés, and M. Marín, "Landslide early warning systems: a perspective from the internet of things," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 13, no. 2, p. 9, 2023.
- [3] A. Souri, A. Hussien, M. Hoseyninezhad, and M. Norouzi, "A systematic review of iot communication strategies for an efficient smart environment," *smart environment*, vol. 33, no. 3, p. 112, 2022.
- [4] K. A. C. Tapia, "Redes de sensores inalámbricos para iot: automatización de redes inalámbricas de sensores," *TIC - Ingeniería en Telecomunicaciones (FIEE)*, vol. 1, no. 1, p. 74, 2022.
- [5] C. Moran and E. Daniel, "Tecnologías de comunicaciones en iot: simulación de un sistema de comunicaciones utilizando la tecnología ieee 802.11ah," *TIC - Ingeniería en Telecomunicaciones (FIEE)*, vol. 1, no. 1, p. 71, 2022.
- [6] M. Aufič, G. Herrera, R. Mateos, E. Poyiadji, L. Quental, B. Severine, T. P. L. Podolszki, S. Calcaterra, A. Kociu, B. Warmuz, J. Jelének, K. Hadjicharalambous, G. Peterson, C. Dashwood, P. Ondrus, V. Minkevicius, S. Todorović, J. Jørgen, and J. Marturia, "Landslide monitoring techniques in the geological surveys of europe," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 31, pp. 47 593–47 614, 2022.
- [7] C. Parra, "Identificación de superficies de rotura en laderas sobre suelos residuales mediante sondeos eléctricos verticales," *Caracterización de la pluviosidad*, vol. 1, no. 1, p. 68, 2013.
- [8] N. Bounemour, R. Benzaid, H. Kherrouba, and S. Atoub, "Landslides in mila town (northeast algeria): causes and consequences," *Arabian Journal of Geosciences* 2022, vol. 15, no. 8, pp. 1–15, 2022.
- [9] J. Álvarez, J. Sierra, F. Amaya, J. Herrera, and D. Hidalgo, "Validación experimental de un método analítico para el monitoreo de movimientos de tierra en masa mediante sensores de fibra óptica," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 32, no. 2, pp. 43–60, 2022.
- [10] P. Chaganti, K. Vasireddy, E. Reddy, and R. Dondeti, "Predicting landslides and floods with deep learning," *2023 4th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems, ICESC 2023 - Proceedings*, vol. 1, no. 1, pp. 1259–1265, 2023.
- [11] V. Viteri and C. Gustavo, "Susceptibilidad a los deslizamientos de tierra en el campus de los Ángeles: Universidad del sur de manabí," *Jornadas de Investigación Filosofía y Letras 2022 - IX. Investigaciones en Desarrollo Local, Vulnerabilidad y Gestión de Riesgos*, vol. 1, no. 1, p. 1, 2022.
- [12] C. Álvarez Ipo and M. León, "Análisis de susceptibilidad de riesgo por deslizamiento de tierra mediante fotogrametría con drones, en la parroquia belisario quevedo, bosque antenas del pichincha," *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*, vol. 1, no. 1, p. 103, 2022.
- [13] E. Z. Infante, "Sistema de redes de sensores para la predicción y prevención de deslizamientos de tierra," *Repositorio TEC*, vol. 1, no. 1, p. 84, 2012.
- [14] M. Rojas, E. Casanovas, and F. Ortolá, "Estado actual y caso de uso de los sistemas de respuesta rápida," *Revista Española de Anestesiología y Reanimación*, vol. 70, no. 1, pp. 27–33, 2023.
- [15] N. Casagli, E. Intrieri, V. Tofani, G. Gigli, and F. Raspini, "Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques," *Nature Reviews Earth y Environment* 2023, vol. 4, no. 1, pp. 51–64, 2023.
- [16] P. Kumar, V. Yanambaka, and A. Abdelgawad, "Internet of things: Security and solutions survey," *Sensors* 2022, vol. 22, no. 1, p. 7433, 2022.
- [17] N. Venu, ArunKumar, and K. Vaigandla, "Review of internet of things (iot) for future generation wireless com-

- munications,” *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, vol. 22, no. 1, p. 8, 2022.
- [18] C. Das, A. Mumu, F. Ali, S. Sarker, Muyeen, and S. Das, “Toward iort collaborative digital twin technology enabled future surgical sector: Technical innovations, opportunities and challenges,” *IEEE Xplore*, vol. 10, no. 1, pp. 129 079–129 104, 2022.
- [19] Prol, M. Ferre, Saleem, Välisuo, Pinell, and Lohan, “Position, navigation, and timing (pnt) through low earth orbit (leo) satellites: A survey on current status, challenges, and opportunities,” *IEEE Xplore*, vol. 10, no. 1, pp. 83 971–84 002, 2022.
- [20] Haibo, B. Li, S. Jia, L. Nie, T. Wu, and Z. Yang, “Leo enhanced global navigation satellite system (legnss): progress, opportunities, and challenges,” *Geo-spatial Information Science*, vol. 5, no. 1, pp. 1–13, 2022.
- [21] X. Liu, “Leo satellite communication in iort: A virtual miso model,” *2023 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC*, vol. 1, no. 1, pp. 106–110, 2023.
- [22] S. technologies, “Swarm m138 modem - evaluation kit quickstart guide,” *2021 Swarm technologies INC.*, vol. 1, no. 1, p. 22, 2021.
- [23] S. space technologies, “Swarm - low cost, global satellite connectivity for iot,” *2021 Swarm technologies INC.*, vol. 1, no. 1, p. 22, 2021.
- [24] M. Centenaro, C. E. Costa, F. Granelli, C. Sacchi, and L. Vangelista, “A survey on technologies, standards and open challenges in satellite iot,” *IEEE Xplore*, vol. 23, no. 2, pp. 1693–1720, 2021.
- [25] C. Gavrilă, V. Popescu, M. Alexandru, M. Murroni, and C. Sacchi, “An sdr-based satellite gateway for internet of remote things (iort) applications,” *IEEE Xplore*, vol. 8, no. 1, pp. 115 423–115 436, 2020.
- [26] Prakasam, Aravinth, Varinder, Kanwar, and Nagarajan, “Design and development of real-time landslide early warning system through low cost soil and rainfall sensors,” *Science Direct*, vol. 45, no. 1, pp. 5649–5654, 2021.
- [27] M. Chu, A. Patton, J. R. C. Siebert, J. Selker, C. Walter, and C. Udell, “Sitkanet: A low-cost, distributed sensor network for landslide monitoring and study,” *HardwareX*, vol. 9, no. 1, p. 191, 2021.
- [28] G. Kinman, Željko Žilić 2, and D. Purnell, “Scheduling sparse leo satellite transmissions for remote water level monitoring,” *Sensors 2023*, vol. 23, no. 12, p. 5581, 2023.
- [29] H. Huang, S. Guo, W. Liang, and K. Wang, “Online green data gathering from geo-distributed iot networks via leo satellites,” *IEEE International Conference on Communications*, vol. 1, no. 1, p. 1109, 2018.
- [30] UIT-T, “serie y: infraestructura mundial de la información, aspectos del protocolo internet y redes de la próxima generación,” *sector de normalización de las telecomunicaciones de la ITU*, vol. 22, no. 1, p. 20, 2022.
- [31] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Std. 802.11-2016, 2016.
- [32] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation*, 3GPP Std. 36.211, 2020.
- [33] *Quality of service and performance parameters for IP networks*, ITU-T Std. G.108, 2002.