



Alarma temprana satelital para comunidades rurales de Veracruz con tecnología IoT

Fredy Juárez Pérez ^{1}, José Osorio Antonia¹, Edgar Pulido Lara¹, Fernando Juárez Reyes¹, Osiel Daniel Ramírez Montiel¹*

¹TecNM-Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache.

*email corresponsal: fredy.jp@alamo.tecnm.mx

RESUMEN

En muchas comunidades rurales del estado de Veracruz, los huracanes representan una amenaza constante para la vida de las personas. La falta de acceso a Internet y telecomunicaciones limita la capacidad de emitir alertas oportunas y prevenir tragedias. Para responder a este problema, se desarrolló un sistema de alarma temprana que funciona de forma autónoma y puede ser activado por las autoridades de protección civil desde su centro de operaciones de forma remota, gracias al uso de tecnología IoT y conectividad satelital Starlink.

El sistema utiliza luces LED codificadas por colores, que indican a la población el nivel de peligro. Se basa en el protocolo oficial de alertamiento para ciclones tropicales SIAT-CT y está diseñado para ser entendido fácilmente por cualquier persona. El equipo se instaló en una comunidad rural desconectada y funcionó de manera exitosa: la señal llegó rápidamente, los colores fueron comprendidos por los habitantes y el sistema operó incluso bajo lluvia.

Este proyecto demuestra que es posible proteger vidas humanas en zonas marginadas con soluciones accesibles y replicables. La tecnología satelital, combinada con herramientas simples, puede marcar la diferencia ante los efectos del cambio climático y la falta de infraestructura.

Palabras clave: alarma temprana, comunidades rurales, huracanes, Starlink, tecnología IoT

ABSTRACT

In many rural communities of the state of Veracruz, hurricanes represent a constant threat to human life. The lack of access to the Internet and telecommunications limits the ability to issue timely alerts and prevent tragedies. To address this problem, an early warning system was developed that operates autonomously and can be activated remotely by civil protection authorities through the use of IoT technology and Starlink satellite connectivity.

The system uses color-coded LED lights to indicate the level of danger to the population. It is based on the official early warning protocol for tropical cyclones SIAT-CT and is designed to be easily understood by any person. The device was installed in a disconnected rural community and functioned successfully: the signal was transmitted quickly, the color codes were clearly understood by the residents, and the system operated even during rainfall.

This project demonstrates that it is possible to protect human lives in marginalized areas using accessible and replicable solutions. Satellite technology, combined with simple tools, can make a difference in facing the effects of climate change and lack of infrastructure.

Keywords: early warning, rural communities, hurricanes, Starlink, IoT technology

INTRODUCCIÓN

Veracruz es uno de los estados más golpeados por huracanes en México, en zonas urbanas muchas veces las alertas llegan por radio, redes sociales o televisión. Pero en las comunidades rurales aisladas, la situación es diferente: no hay cobertura de celular, ni acceso a Internet, y mucho menos sistemas de alerta efectivos. Esta desconexión tecnológica pone en riesgo la vida de miles de personas.

Durante el paso del huracán Grace en 2021, se reportaron afectaciones graves en comunidades rurales del norte de Veracruz como se observa en la figura 1. Muchas de ellas no sabían que el fenómeno se acercaba. En otros casos, como el huracán Otis en

Acapulco (2023), la falta de un aviso a tiempo fue determinante en la magnitud del desastre. Estos hechos muestran la importancia de contar con sistemas de alerta accesibles, adaptados al entorno y a las capacidades locales.



Figura 1. Impacto del huracán Grace en 2021 en Tuxpan Veracruz.
Fuente: El Financiero (2024)

Existen enfoques de alerta como radiofrecuencia, altavoces o SMS, pero dependen de infraestructura terrestre poco confiable en zonas rurales. En contraste, la solución IoT + Starlink permite autonomía y confiabilidad aún en eventos extremos (Gomes et al., 2016; Donati & General, 2022; Chiaraviglio et al., 2020).

Starlink fue seleccionado por su baja latencia (<40 ms), estabilidad en clima adverso y operación independiente de infraestructura terrestre (Deutschmann et al., 2022; Juárez Pérez et al., 2023). Este servicio ha mostrado ventajas sobre otras soluciones satelitales convencionales por su arquitectura de baja órbita terrestre (LEO), lo que reduce la latencia y mejora la estabilidad de la conexión, factores cruciales en sistemas de alerta en tiempo real. Además, su implementación práctica en campo ha sido validada por el equipo de investigación mediante pruebas en condiciones adversas que confirmaron su eficacia operativa.

Este artículo presenta una solución sencilla pero efectiva, una alarma temprana que se conecta a la nube mediante Starlink, funciona con energía autónoma y puede ser entendida por cualquier habitante. Está pensada para comunidades que no tienen otra forma de recibir avisos y que, por su ubicación, están expuestas a lluvias intensas, inundaciones y ciclones. Con esta tecnología, se busca no solo alertar, sino también

empoderar a las comunidades rurales para que se preparen mejor ante los riesgos naturales.

TRABAJO RELACIONADO

Diversos trabajos han abordado la problemática de alertas tempranas en zonas con infraestructura limitada mediante tecnologías de bajo costo. (Patel & Shah, 2020) desarrollaron un sistema IoT para regiones propensas a desastres, utilizando sensores y lógica distribuida, similar en su enfoque técnico al que aquí se propone. De forma complementaria, (Pham et al., 2023) exploraron arquitecturas híbridas que combinan LoRa y enlaces satelitales, resaltando el valor de las tecnologías autónomas y resilientes en entornos sin conectividad convencional.

En cuanto a la infraestructura de redes de comunicación, (Koga & Matsumoto, 2021) proponen arquitecturas inalámbricas resilientes para escenarios de emergencia, una preocupación también central en nuestro sistema basado en MQTT y Starlink. Estas propuestas coinciden en la necesidad de garantizar comunicación robusta durante eventos críticos.

Desde la perspectiva social, (Kruke & Smith, 2021; García & Camarena, 2022) han documentado la importancia de la participación comunitaria en el éxito de los sistemas de alerta. Ambos estudios destacan cómo la apropiación local y la codificación sencilla de los mensajes elevan la eficacia del sistema, coincidiendo con la validación participativa realizada en nuestra propuesta.

A diferencia de estos enfoques, nuestra propuesta integra todos estos componentes en una solución concreta, validada en campo, que combina conectividad satelital Starlink, autonomía energética, activación remota y lenguaje visual estandarizado bajo el protocolo SIAT-CT (SIAT-CT; Secretaría de Gobernación, n.d.). Esta integración técnica y social en un entorno rural desconectado representa un avance significativo y replicable frente a las soluciones reportadas.

METODOLOGÍA

La elección del protocolo MQTT y la nube de AWS se fundamenta en su alta disponibilidad y adaptabilidad a condiciones de conectividad variable, como han demostrado aplicaciones similares en contextos rurales y de emergencia (Donati & General, 2022). Este tipo de arquitectura distribuida ha sido validada por Gomes et al. (2016) para escenarios de infraestructura limitada.

Durante la fase de implementación del sistema en la comunidad rural de La Gloria, se llevaron a cabo sesiones informativas donde se explicó el funcionamiento del sistema de alarma temprana, el significado de los colores del semáforo visual y la importancia de la respuesta oportuna ante fenómenos meteorológicos. Esta retroalimentación permitió hacer ajustes menores al diseño, promoviendo apropiación comunitaria y fortaleciendo su eficacia operativa (Kruke & Smith, 2021).

Adicionalmente, se promovió el uso del sistema mediante ejercicios simulados y demostraciones visuales para reforzar la comprensión de los distintos niveles de alerta. Este enfoque participativo no solo aumentó la aceptación social de la tecnología, sino que también contribuyó a consolidar redes de comunicación internas dentro de la comunidad que fortalecen su capacidad de respuesta ante eventos extremos.

Para desarrollar el sistema de alerta temprana, se implementó un enfoque técnico basado en plataformas de bajo costo, accesibles y energéticamente eficientes. El prototipo fue construido utilizando un microcontrolador NodeMCU con chip ESP8266, programado en lenguaje Arduino mediante su entorno de desarrollo integrado IDE. Este dispositivo incluye conectividad Wi-Fi y se integra con un sistema de control remoto que utiliza el protocolo MQTT, reconocido por su ligereza y eficiencia en entornos de conectividad limitada.

El broker MQTT (Mosquitto) y la interfaz gráfica de control (Node-RED) fueron alojados en un servidor virtual EC2 de Amazon Web Services (AWS), con sistema operativo Linux. Esta infraestructura en la nube permite a las autoridades de Protección Civil activar,

monitorear y gestionar el sistema desde cualquier ubicación con acceso a Internet como se muestra en la Figura 2.

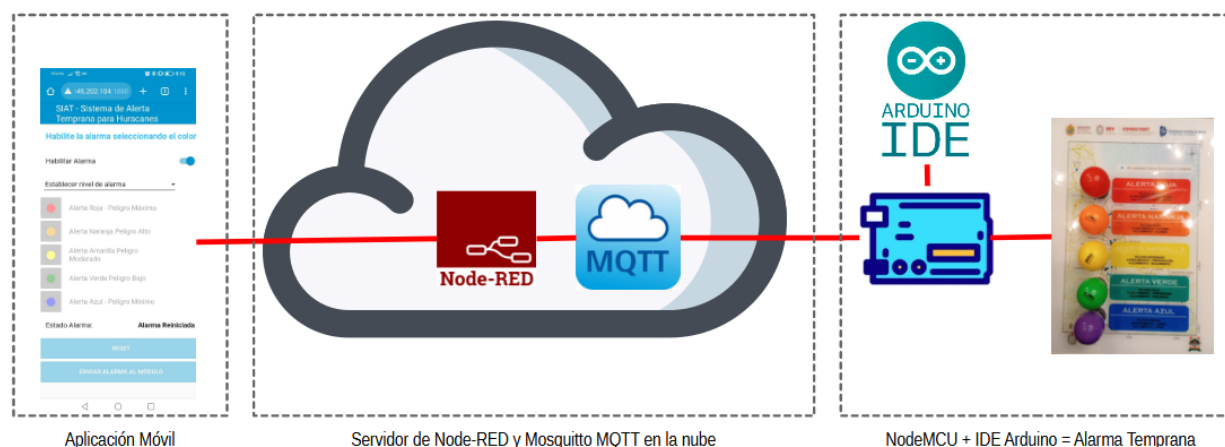


Figura 2. Arquitectura y diseño del sistema de alarma temprana para el módulo principal.
Fuente: Elaboración propia

El sistema de alertamiento en campo está compuesto por un semáforo visual con luces LED de alta potencia en cinco colores: azul, verde, amarillo, naranja y rojo, siguiendo el protocolo SIAT-CT (Secretaría de Gobernación, n.d.). El equipo es alimentado por baterías recargables y puede funcionar también con paneles solares, lo cual garantiza su autonomía en zonas sin energía eléctrica estable como se muestra en la Figura 3.

La conectividad con Internet se logra mediante el servicio satelital Starlink, cuya red de satélites en órbita baja permite mantener una latencia menor a 40 ms, habilitando comunicación en tiempo real incluso durante condiciones climáticas adversas.

La validación del sistema se realizó mediante su instalación en una comunidad rural del municipio de Álamo Temapache, verificando el encendido remoto, la recepción de la señal, el tiempo de respuesta, la visibilidad de las señales y la comprensión del sistema por parte de los habitantes. Las pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones reales de campo, con alimentación energética completamente autónoma.

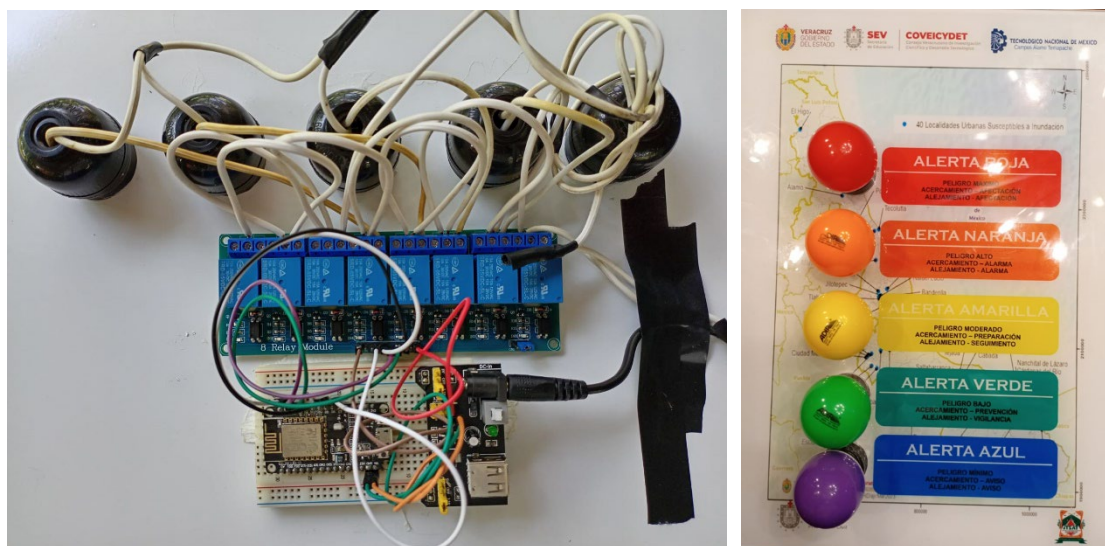


Figura 3. Diseño de la alarma temprana para los módulos operacionales, vista reverso y adverso.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

La efectividad del enlace satelital mediante Starlink fue comprobada bajo condiciones reales, validando observaciones recientes sobre su rendimiento confiable frente a condiciones climáticas adversas y su idoneidad en zonas marginadas (Deutschmann et al., 2022; Juárez Pérez et al., 2023).

El sistema fue instalado en una comunidad rural “La Gloria”, municipio de Álamo Temapache, donde muchas viviendas no cuentan con acceso confiable a servicios básicos. Durante las pruebas de campo, se comprobó que la alarma podía activarse a distancia desde una sede con acceso a Internet, y la señal llegaba en menos de un segundo.

Los habitantes reconocieron fácilmente el significado de las luces de colores, lo que demuestra que el diseño es intuitivo. Incluso bajo condiciones de lluvia como se muestra en la Figura 4, el sistema funcionó sin interrupciones, ya que cuenta con alimentación propia. Esto validó su utilidad para enfrentar situaciones de emergencia en lugares donde fallan los medios tradicionales de comunicación.

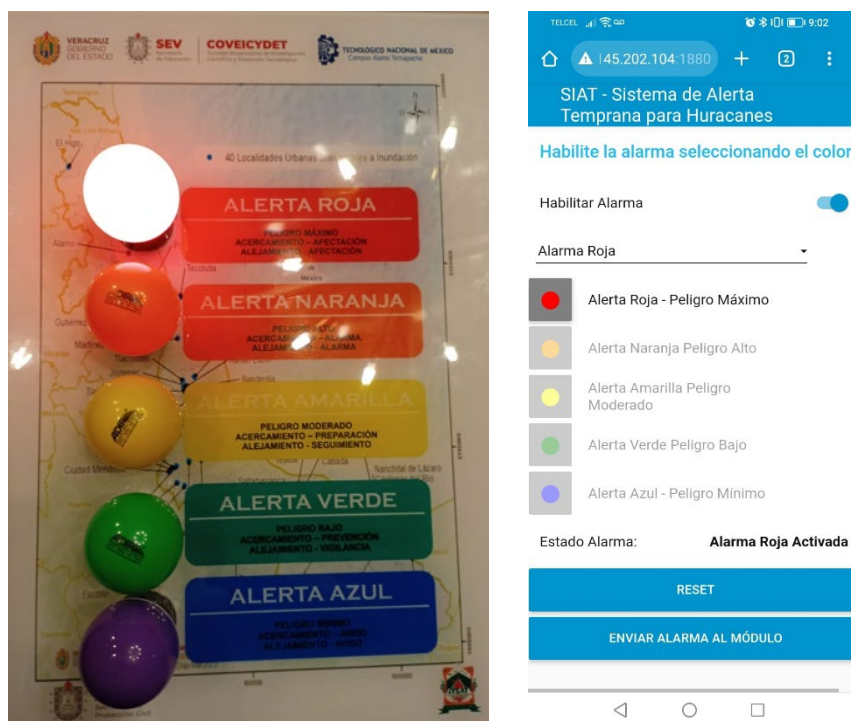


Figura 4. Alarma temprana interfaz operacional en teléfono móvil activando alarma alerta roja.
Fuente: Elaboración propia.

Además, el costo reducido del sistema lo hace viable para replicarse en otras localidades con características similares. El uso de Starlink permitió una conexión rápida y estable, incluso en zonas donde nunca ha llegado un proveedor convencional de Internet. En resumen, se logró demostrar que una solución tecnológica sencilla puede tener un alto impacto social y salvar vidas en contextos vulnerables.

La implementación del sistema en campo demostró que tecnologías emergentes como Starlink pueden ser clave en la reducción del riesgo de desastres en zonas marginadas. A diferencia de otros enfoques que requieren redes móviles o cobertura de fibra óptica, esta solución funcionó completamente independiente de infraestructura terrestre como se muestra en la Figura 5.

Estudios previos han demostrado que las alertas tempranas reducen significativamente la mortalidad durante ciclones, siempre que sean comprendidas por la población

(Woodward y Samet, 2018). Nuestra propuesta coincide con este hallazgo y refuerza que el lenguaje visual sencillo y la activación remota son dos factores críticos.



Figura 5. Alarma temprana infraestructura desplegada en campo.
Fuente: Elaboración propia.

Además, al compararla con otras iniciativas de alerta basadas en radio o SMS, esta alternativa ofrece mayor confiabilidad y autonomía energética. El éxito en La Gloria puede ser replicado en comunidades similares, con ajustes mínimos y bajo costo.

CONCLUSIONES

Estas evidencias coinciden con estudios recientes que recomiendan integrar tecnologías de conectividad autónoma y lenguaje visual como medios eficaces para alertamiento y resiliencia en contextos rurales (Kruke & Smith, 2021; Woodward & Samet, 2018).

Las pruebas realizadas muestran que esta tecnología puede ser una herramienta clave para proteger vidas humanas en comunidades marginadas. Su bajo costo, fácil instalación y operación remota la hacen especialmente útil en zonas rurales sin conectividad.

Además, al utilizar un lenguaje visual sencillo, el sistema puede ser comprendido por cualquier persona, sin necesidad de entrenamiento técnico. Esto refuerza su potencial como modelo replicable en muchas otras regiones del país.

En un contexto de cambio climático y fenómenos meteorológicos cada vez más intensos, soluciones como esta representan una forma concreta y efectiva de reducir la vulnerabilidad de quienes históricamente han estado más expuestos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México (TECNM), por el apoyo otorgado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2024 (proyecto 19553.24-PD).

BIBLIOGRAFIA

- Secretaría de Gobernación (SEGOB). (n.d.). Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT; Secretaría de Gobernación, n.d.). Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Recuperado de <https://www.gob.mx/cenapred/acciones-y-programas/sistema-de-alerta-temprana-para-ciclones-tropicales>
- Aitsi-Selmi, A., Egawa, S., Sasaki, H., Wannous, C., & Murray, V. (2019). The Sendai Framework: A critical milestone in sustainable development. *International Journal of Disaster Risk Science*, 10(1), 1–12.
- Koga, Y., & Matsumoto, T. (2021). Resilient wireless networks for emergency communication. *IEEE Communications Magazine*, 59(3), 72–77.
- Patel, K., & Shah, P. (2020). IoT-enabled smart warning system for disaster-prone zones. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, 1105–1118.
- García, C., & Camarena, S. (2022). Sistemas comunitarios de alerta temprana en América Latina: lecciones aprendidas. *Revista de Gestión del Riesgo de Desastres*, 8(1), 45–63.

- Pham, M. T., Le, T. D., & Phung, T. H. (2023). Low-cost disaster communication systems using LoRa and satellite hybrid architecture. *Sensors*, 23(4), 1083.
- Chiaraviglio, L. et al. (2020). Planning 5G networks in rural and low-income areas: The role of satellite backhaul. *IEEE Access*, 8, 132757–132775.
- Deutschmann, J., Hielscher, K. S. & German, R. (2022). Broadband internet access via satellite: performance measurements with different operators and applications. *ITG-Symposium*.
- Donati, A. & General, E. S. (2022). Integrating satellite applications in disaster risk management.
- Gomes, T., Tapolcai, J., Esposito, C., Hutchison, D., Kuipers, F., Rak, J. et al. (2016). A survey of strategies for communication networks to protect against large-scale natural disasters. *IEEE RNDM*.
- Juárez Pérez, F., Lugo Clemente, H., Reyes Juárez, F., Domínguez Carrillo, G. & Martínez R., S. (2023). Estudio del desempeño de comunicaciones satelitales Starlink para infraestructura móvil computacional. *TecNM Álamo Temapache*.
- Kruke, B. I. & Smith, K. (2021). Community participation and resilience in disaster early warning systems. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 64, 102496.
- Woodward, A. J. y Samet, J. M. (2018). Climate change, hurricanes, and health. *American Journal of Public Health*, 108(1), 33–35.