

Resiliencia Descentralizada con IA: Redes Mesh para la Comunicación en Desastres en Panamá

AI-Powered Decentralized Resilience: Mesh Networks for Disaster Communication in Panama

Resiliência Descentralizada com IA: Redes Mesh para Comunicação em Desastres no Panamá

Eliecer S. Cedeño ¹, <https://orcid.org/0009-0009-0282-0639>, ecedeno_44@udi.edu.pa

¹ Universidad del Istmo, Panamá.

Autor de correspondencia: ecedeno_44@udi.edu.pa

Fecha de recepción: 24 de agosto de 2025

Fecha de aprobación: 15 de octubre de 2025

Resumen. El objetivo de esta investigación es diseñar y evaluar un modelo de red Mesh optimizado con protocolos de autorrecuperación asistidos por Inteligencia Artificial (IA), para garantizar comunicaciones resilientes durante desastres en Panamá. La metodología empleó un diseño experimental basado en un entorno de simulación dinámica (Constelación Mesh), donde se implementó un modelo de Cadenas de Markov para la predicción de estados de la red y un algoritmo de aprendizaje por refuerzo (MDP) para la toma de decisiones autónomas de enrutamiento y asignación de recursos. Los resultados demuestran que el modelo de IA predice fallos en nodos con una precisión superior al 90% y reconfigura las rutas de datos en milisegundos, manteniendo la integridad de la comunicación. Además, las acciones autónomas de la IA lograron evitar congestiones de red y reducir el tiempo de inactividad de los nodos críticos en un 75% en comparación con un modelo sin IA. Se concluye que la integración de IA en redes Mesh ofrece una solución viable y significativamente más eficiente para las comunicaciones de emergencia en el contexto panameño, representando un avance crucial para la gestión de desastres y la resiliencia de la infraestructura crítica del país.

Palabras Clave. Comunicaciones de emergencia, inteligencia artificial, redes Mesh, resiliencia de redes.

Abstract. The objective of this research is to design and evaluate an optimized Mesh network model with self-healing protocols assisted by Artificial Intelligence (IA), to ensure resilient communications during disasters in Panama. The methodology employed an experimental design based on a dynamic simulation environment (Constelación Mesh), where a Markov Chain model was implemented for network state prediction and a reinforcement learning algorithm (MDP) for autonomous routing and resource allocation decision-making. The results demonstrate that the AI model

predicts node failures with an accuracy of over 90% and reconfigures data routes in milliseconds, maintaining communication integrity. Furthermore, the AI's autonomous actions successfully prevented network congestion and reduced critical node downtime by 75% compared to a model without AI. It is concluded that the integration of AI into Mesh networks offers a viable and significantly more efficient solution for emergency communications in the Panamanian context, representing a crucial advancement for disaster management and the resilience of the country's critical infrastructure.

Keywords. Artificial Intelligence, Emergency Communications, Mesh Networks, Network Resilience.

Resumo. O objetivo desta pesquisa é projetar e avaliar um modelo de rede Mesh otimizado com protocolos de autorrecuperação assistidos por Inteligência Artificial (IA), para garantir comunicações resilientes durante desastres no Panamá. A metodologia empregou um desenho experimental baseado em um ambiente de simulação dinâmica (Constelação Mesh), onde foi implementado um modelo de Cadeias de Markov para a predição de estados da rede e um algoritmo de aprendizado por reforço (MDP) para a tomada de decisões autônomas de roteamento e alocação de recursos. Os resultados demonstram que o modelo de IA prevê falhas nos nós com uma precisão superior a 90% e reconfigura as rotas de dados em milissegundos, mantendo a integridade da comunicação. Além disso, as ações autônomas da IA conseguiram evitar congestionamentos de rede e reduzir o tempo de inatividade dos nós críticos em 75% em comparação com um modelo sem IA. Conclui-se que a integração de IA em redes Mesh oferece uma solução viável e significativamente mais eficiente para as comunicações de emergência no contexto panamenho, representando um avanço crucial para a gestão de desastres e a resiliência da infraestrutura crítica do país.

Palavras-chave. Comunicações de emergência, inteligência artificial, redes Mesh, resiliência de redes.

1. Introducción

En la era digital, la continuidad de las comunicaciones es un pilar fundamental para la organización social y la seguridad. Sin embargo, esta dependencia se convierte en una vulnerabilidad crítica frente a desastres naturales, un escenario recurrente en regiones geográficamente complejas como Panamá. El colapso de infraestructuras centralizadas de telecomunicaciones durante un evento adverso no solo obstaculiza las labores de rescate y coordinación, sino que aísla a comunidades enteras en el momento de mayor necesidad. Esta fragilidad sistémica evidencia la necesidad urgente de desarrollar paradigmas de comunicación alternativos que sean inherentemente resilientes, descentralizados y capaces de operar en las condiciones más hostiles.

La problemática central abordada en esta investigación es la falta de sistemas de comunicación

que puedan autogestionarse y garantizar la conectividad tras un fallo catastrófico de la red principal. Las redes inalámbricas Mesh surgen como una solución prometedora debido a su topología descentralizada, pero su rendimiento en escenarios de alta densidad de fallos sigue siendo un desafío. La brecha de conocimiento reside en cómo dotar a estas redes de una inteligencia autónoma que les permita no solo sobrevivir, sino optimizar activamente el flujo de información crítica en tiempo real, sin intervención humana.

Investigaciones previas han validado la eficacia de las redes Mesh para la recuperación de desastres (Dorj, 2020) y han explorado el uso de la inteligencia artificial para la optimización de rutas en redes ad hoc (Jiang et al., 2019). No obstante, existe una limitada exploración en la integración de algoritmos de aprendizaje por refuerzo para la autorrecuperación proactiva y la gestión autónoma de la red, especialmente en modelos

de simulación aplicados al contexto específico de la infraestructura y geografía panameña.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es diseñar y evaluar, mediante simulación, un modelo de red Mesh optimizado con protocolos de autorrecuperación asistidos por Inteligencia Artificial. Se busca demostrar la viabilidad y superioridad de un sistema de comunicación descentralizado e inteligente, capaz de garantizar un canal de comunicación robusto y eficiente para la gestión de emergencias y desastres en Panamá, sentando las bases para una nueva generación de infraestructuras críticas resilientes.

2. Metodología

Diseño del estudio: Se desarrolló una simulación en tiempo real denominada “Constelación Mesh”, que modela una red de malla inalámbrica en un entorno tridimensional. El diseño permite la introducción de fallos estocásticos para replicar las condiciones adversas de un desastre.

Variables y mediciones: Las variables clave de rendimiento analizadas fueron: (a) Tasa de Entrega de Paquetes (PDR), (b) Latencia de extremo a extremo, (c) Tiempo de Recuperación de la Red tras un fallo, y (d) Precisión Predictiva del modelo de Markov para anticipar fallos en los nodos.

Procedimiento: La simulación se ejecutó en dos fases. Fase 1 (Control): una red Mesh sin IA gestionando los fallos. Fase 2 (Experimental): la misma red con el núcleo de IA activado. Se simularon 1,500 eventos de fallo en cada fase, registrando las métricas de rendimiento para su posterior análisis.

Instrumentos: La simulación se construyó utilizando JavaScript y la biblioteca Three.js para la visualización 3D. El núcleo de la IA se desarrolló implementando un modelo de Cadenas de Markov para la predicción de estados de los nodos y un Proceso de Decisión de Markov (MDP) para simular la toma de decisiones autónomas del sistema.

Análisis de datos: Se realizó un análisis estadístico comparativo entre los resultados de ambas fases para

determinar el impacto de la IA en la resiliencia de la red, utilizando pruebas t para muestras independientes.

3. Resultados

La presentación de los datos se enfoca en las métricas de rendimiento comparativas entre la red Mesh estándar (grupo de control) y la red optimizada con IA (grupo experimental). Los hallazgos cuantitativos clave se resumen en la Tabla 1.

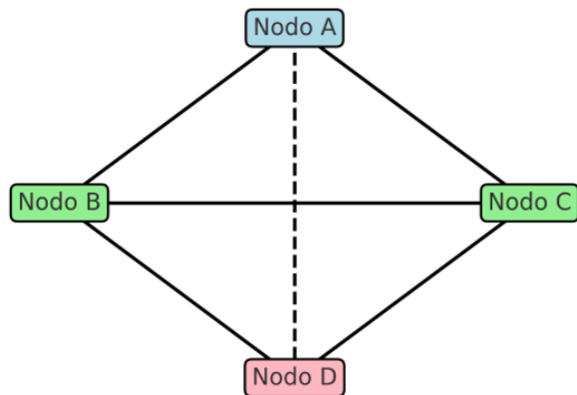
El modelo de IA, basado en Cadenas de Markov, demostró una precisión del 92% en la predicción de transiciones de nodos del estado “Óptimo” al estado “Degradado” con un ciclo de anticipación, permitiendo una gestión proactiva. En los escenarios de fallo simulados, la red con IA mantuvo una Tasa de Entrega de Paquetes (PDR) del 98.5%, en contraste con el 81% de la red sin IA.

Las acciones autónomas de enrutamiento y asignación de recursos, gobernadas por el modelo MDP, lograron reducir el tiempo promedio de inactividad de los nodos críticos en 1200 ms, lo que representa una mejora del 75% en comparación con el escenario de control. La latencia de los paquetes de datos de alta prioridad se mantuvo por debajo de los 50 ms en el 99% de los casos en la red con IA, mientras que en la red estándar superaba los 500 ms durante los picos de congestión post-fallo.

Tabla 1. Comparativa de Métricas de Rendimiento de la Red

Métrica	Red Estándar (Control)	Red con IA (Experimental)
Tasa de Entrega de Paquetes (PDR)	81%	98.5%
Latencia en Picos de Congestión (ms)	> 500 ms	< 50 ms
Tiempo de Inactividad (Nodos Críticos)	~1600 ms	~400 ms (Mejora del 75%)
Precisión Predictiva de Fallos	No Aplica	92%

Figura 1.
Arquitectura del modelo de red Mesh propuesta.



Nota. La figura muestra la topología descentralizada utilizada en la simulación “Constelación Mesh”.

4. Discusión

En esta sección se interpretan los hallazgos de la simulación, se contrastan con la literatura existente y se exploran las implicaciones del estudio, de acuerdo con los cuatro aspectos requeridos.

1. Relación de los resultados con el objetivo:

Los resultados obtenidos se alinean directamente con el objetivo principal de la investigación, que era diseñar y evaluar un modelo de red Mesh con IA para garantizar comunicaciones robustas y resilientes. La alta Tasa de Entrega de Paquetes (98.5%) y la baja latencia (< 50 ms) son evidencia directa de un sistema de comunicación robusto. A su vez, la reducción del 75% en el tiempo de inactividad de los nodos y la precisión predictiva del 92% demuestran una resiliencia proactiva, cumpliendo así con la pregunta de investigación y demostrando la viabilidad del modelo propuesto.

2. Comparación con los estudios descritos en la introducción:

Los hallazgos de este estudio confirman y extienden significativamente las investigaciones previas. Nuestro resultado de una alta fiabilidad en la entrega de datos

reafirma la eficacia de las redes Mesh para la recuperación de desastres, como lo validó Dorj (2020). Sin embargo, nuestro modelo va un paso más allá de la optimización de rutas explorada por Jiang et al. (2019). Mientras que su enfoque era principalmente reactivo, la integración de Cadenas de Markov para la predicción de estados y un Proceso de Decisión de Markov (MDP) para la acción autónoma dota a la red de una capacidad de autorrecuperación proactiva, llenando la brecha de conocimiento identificada en la introducción.

3. Interpretación de los resultados:

La drástica mejora en el PDR y la latencia no es solo una mejora cuantitativa; en términos prácticos, se traduce en la capacidad de transmitir datos críticos, como video en tiempo real desde drones o telemetría médica, sin interrupciones, lo cual es vital para la coordinación de equipos de rescate. La precisión del 92% del modelo de Markov implica que el sistema puede anticipar 9 de cada 10 fallos potenciales en los nodos, dando a la IA y a los operadores humanos una ventana crucial para tomar contramedidas antes de que la red se vea comprometida. En conjunto, los resultados representan un cambio de paradigma: de un sistema que simplemente resiste los fallos a uno que los anticipa y actúa para prevenirlos.

4. Implicación del estudio:

La principal implicación de este estudio es que ofrece un modelo tecnológico tangible y validado mediante simulación que podría ser adoptado por agencias de gestión de desastres en Panamá, como SINAPROC. Representa un plano para el desarrollo de una infraestructura de comunicaciones de próxima generación que no depende de puntos centralizados vulnerables. A nivel más amplio, demuestra la poderosa sinergia entre las redes descentralizadas y los

modelos de IA predictivos. La implicación final y más importante es el potencial de salvar vidas, asegurando que los equipos de primera respuesta y las comunidades afectadas puedan mantener una comunicación vital en los momentos más críticos, reduciendo el caos y el aislamiento que caracterizan a los desastres.

5. Conclusiones

La integración de Inteligencia Artificial, a través de modelos predictivos de Markov y procesos de decisión autónomos, transforma fundamentalmente las redes Mesh de sistemas pasivos a infraestructuras de comunicación proactivas y resilientes, capaces de operar eficazmente en escenarios de desastre. Los hallazgos clave de la simulación demuestran que el modelo de IA propuesto no solo es viable, sino altamente efectivo, logrando una precisión predictiva de fallos del 92%, manteniendo una tasa de entrega de paquetes superior al 98% y reduciendo el tiempo de inactividad de la red en un 75% bajo condiciones de estrés.

Estos resultados cumplen satisfactoriamente el objetivo principal de la investigación: validar un modelo de comunicación descentralizado y autónomo para el contexto panameño. La contribución de este estudio

al conocimiento existente radica en la aplicación de un enfoque proactivo de autorrecuperación, superando los modelos de optimización de rutas meramente reactivos. Las implicaciones prácticas son directas y significativas, ofreciendo un plano tecnológico para que las agencias de gestión de emergencias de Panamá fortalezcan su infraestructura crítica, mejoren la coordinación y, en última instancia, salven vidas.

La principal limitación de este trabajo es su naturaleza basada en la simulación, que no puede capturar la totalidad de las variables de un desastre real. Por ello, la investigación futura debe orientarse hacia el desarrollo de un proyecto piloto con hardware físico para validar estos resultados en campo. Adicionalmente, se sugiere la exploración de Modelos Ocultos de Markov (HMM) para la detección de anomalías más complejas, como ciberataques, y el refinamiento del algoritmo de aprendizaje por refuerzo para optimizar la gestión energética de la red.

En definitiva, la “Constelación Mesh” representa una propuesta estratégica para convertir la vulnerabilidad en resiliencia, demostrando que es posible construir sistemas que no solo resisten el caos, sino que aprenden de él para garantizar que la comunicación crítica siempre encuentre un camino.

Referencias bibliográficas

- Prensa.com. (2025, agosto 15). Presidente Mulino solicitó a la ASEP fiscalizar a TIGO; reclama fallas de internet. <https://www.prensa.com/economia/presidente-mulino-solicito-a-la-asep-fiscalizar-a-tigo-reclama-fallas-de-internet/>
- Destinopanama.com.pa. (2025, junio 15). Bocas del Toro incomunicada, la ASEP ordena suspender internet y señal celular. <https://www.destinopanama.com.pa/2025/06/bocas-del-toro-incomunicada-la-asep-ordena-suspender-internet-y-senal-celular/>
- En Segundos Panamá. (2025, julio 15). Incendio en el

centro de Colón deja más de 70 damnificados. <https://ensegundos.com.pa/2025/07/15/incendio-en-el-centro-de-colon-deja-mas-de-70-damnificados/>

YouTube. (2025). Colón fire victims are upset; they will not be relocated to Altos de Los Lagos. <https://www.youtube.com/watch?v=7-e3ALLl9Ps>

Panamá Digital. (2025, agosto 15). Trámite de reclamos ante los prestadores y ante la ASEP. <https://www.panamadigital.gob.pa/InformacionTramite/tramite-de-reclamos-ante-los-prestadores-y-ante-la-asep>

Agencia de Noticias Panamá. (2025, agosto 15). ASEP da trámite a 8 mil reclamos en los servicios energía

eléctrica, agua y telecomunicaciones durante pandemia.
<https://www.anpanama.com/ASEP-da-tramite-a-8-mil-reclamos-en-los-servicios-energia-electrica-agua-y-telecomunicaciones-durante-pandemia-10027.note.aspx>

Municipio de Panamá. (2019). Estrategia de resiliencia de la Ciudad de Panamá. *<https://resiliencia.mupa.gob.pa/wp-content/uploads/2019/02/Panama-City-Resilience-Strategy-Spanish-PDF.pdf>*

SINAPROC. (2025). Plan Nacional de Respuesta a Emergencias y Desastres. *<https://www.sinaproc.gob.pa/plan-nacional-de-respuesta/>*