



REPÚBLICA DE PANAMÁ
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA

**DISEÑO DE UNA RED DE COMUNICACIONES REDUNDANTE
Y SEGURA PARA LA AUTOPISTA INTELIGENTE
PANAMÁ-COLÓN**

PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER
Maestría Profesional en Redes de Comunicaciones con énfasis en Seguridad
Opción de Titulación: Proyecto de Graduación

Autor(a): Gerardo Gabriel Llorente Muñoz

Cédula / Pasaporte: 8-934-2059

Cohorte: N.º 58 (012025)

Tutor(a): José Munive

Ciudad de Panamá, junio de 2026



REPÚBLICA DE PANAMÁ
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA

**DISEÑO DE UNA RED DE COMUNICACIONES REDUNDANTE
Y SEGURA PARA LA AUTOPISTA INTELIGENTE
PANAMÁ–COLÓN**

PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER
Maestría Profesional en Redes de Comunicaciones con énfasis en Seguridad
Opción de Titulación: Proyecto de Graduación

Autor(a): Gerardo Gabriel Llorente Muñoz

Ciudad de Panamá, junio de 2026



CARTA DE APROBACIÓN DEL TUTOR

Ciudad de Panamá, 18 de junio de 2026

Profesor

Héctor Mazurkiewicz, Ed.D.

Coordinador del Comité de Titulación de Estudios de Grado y Postgrado

Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología

Presente.

Por medio de la presente, en mi carácter de tutor académico del Proyecto de Graduación titulado Diseño de una Red de Comunicaciones Redundante y Segura para la Autopista Inteligente Panamá-Colón, presentado por el estudiante Gerardo Gabriel Llorente Muñoz, con cédula 8-934-2059, aspirante al grado de Magíster en Redes de Comunicaciones con énfasis en Seguridad, hago constar que el trabajo reúne los requisitos académicos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que oportunamente designe el Comité de Titulación.

El trabajo se enmarca en la línea de investigación: Redes de comunicaciones y seguridad de la información en infraestructuras críticas.

Atentamente,

José Munive

Documento de identidad N°: 8-804-492

Tutor académico



INFORME DE ACTIVIDADES DE TUTORÍA

OPCIÓN DE TITULACIÓN: PROYECTO DE GRADUACIÓN

Programa de Maestría: Maestría en Redes de Comunicaciones con énfasis en Seguridad

Estudiante: Gerardo Gabriel Llorente Muñoz

Cohorte: N.º 58 (012025)

Tutor(a): José Munive

Título del trabajo de grado: Diseño de una Red de Comunicaciones Redundante y Segura para la Autopista Inteligente Panamá-Colón

Línea de Investigación: Redes de comunicaciones y seguridad de la información en infraestructuras críticas

Nº	Fecha	Hora	Lugar / medio	Objetivo principal	Observaciones / acuerdos
1	20/4/2026	17:00	Virtual	Validación del trabajo	Ajuste y orientación del trabajo
2	27/04/2026	18:00	Virtual	Validación del trabajo	Cambio en términos usados y cantidad de objetivos
3	12/05/2026	19:00	Virtual	Validación del trabajo	Cambios en el diseño proyectivo
4	08/06/2026	13:00	Virtual	Validación del trabajo	Modificaciones en el alcance
5	16/06/2026	12:00	Virtual	Validación del trabajo	Agregar información detallada y imágenes
6	18/06/2026	12:00	Virtual	Verificación Final	Verificación capítulo IV

Comentarios finales acerca de la investigación: el suscrito declara que las especificaciones anteriores representan fielmente el proceso de dirección académica del trabajo de grado arriba mencionado.

Se declara que el título definitivo de la investigación es: Diseño de una Red de Comunicaciones Redundante y Segura para la Autopista Inteligente Panamá-Colón.

Gerardo Llorente

Firma del estudiante

José Luis Furió

Firma del tutor

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía constante y darme la fortaleza para culminar con éxito esta etapa; a mi familia, pilar fundamental de mi vida y apoyo incondicional en este camino, especialmente a mi madre y abuela por su amor infinito, oraciones y por ser mi motor diario, a mi padre por su guía y por enseñarme el valor de la perseverancia, a mi tía por su respaldo constante y confianza ciega en mis capacidades, a mi primo por su gran compañerismo y motivación, y a toda mi familia en general por creer en mí y celebrar cada uno de mis logros; asimismo, a mis amigos por su lealtad y apoyo invaluable durante los días de arduo trabajo, y a los profesores con quienes he cursado diferentes materias desde el inicio de este gran proceso de educación, por compartir sus conocimientos y formarme con excelencia; y finalmente, a quienes recorren a diario la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta), destinatarios finales de este esfuerzo, con la firme esperanza de que este trabajo contribuya a un mejor futuro para nuestra comunidad.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología por la formación recibida a lo largo del programa de Maestría, y de manera particular a mi tutor, el profesor José Munive, por su acompañamiento metodológico constante y por sus observaciones rigurosas, que orientaron cada etapa del proyecto.

Agradezco igualmente a las instituciones que facilitaron información pública para el diagnóstico de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta), Finalmente, a mis compañeros de cohorte y a mi familia, por la paciencia y el aliento sostenido durante los meses de elaboración de este documento.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I. Planteamiento del problema.....	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Antecedentes del problema.....	3
1.3. Formulación del problema.....	4
Pregunta principal.....	4
Preguntas secundarias.....	4
1.4. Objetivos de la investigación.....	4
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
1.5. Justificación de la investigación.....	5
Justificación académica.....	5
Justificación social.....	6
Justificación profesional.....	6
Justificación institucional.....	6
1.6. Alcance y delimitación del proyecto.....	7
1.7. Línea de investigación.....	8
Capítulo II. Marco teórico.....	10
2.1. Antecedentes de la investigación.....	10
2.2. Bases teóricas.....	11
2.2.1. Comunicaciones vehiculares y V2X.....	11
2.2.2. Tecnologías de acceso.....	12
2.2.3. Redundancia y alta disponibilidad.....	13
2.2.4. Calidad de Servicio (QoS).....	14
2.2.5. Seguridad de la información.....	14
2.2.6. Postes inteligentes autónomos.....	15
2.2.7. Direccionamiento jerárquico y VLISM.....	15
2.2.8. Simulación de redes como técnica de validación.....	15
2.3. Marco normativo y legal.....	16
2.3.1. Normativa Nacional.....	16
2.3.2. Normativa y Estándares Internacionales.....	16
2.4. Definición de términos básicos.....	17
Capítulo III. Marco metodológico.....	21
3.1. Fases de la investigación.....	21
3.2. Selección y justificación de la herramienta de simulación.....	23
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección.....	25
3.4. Procedimiento de validez del diseño.....	25

3.5. Consideraciones éticas.....	25
Capítulo IV. Resultados, análisis y propuesta.....	28
4.1. Diagnóstico de la red actual.....	28
4.2. Análisis comparativo internacional.....	29
4.3. Arquitectura física.....	30
4.3.1 Dimensionamiento de la infraestructura.....	30
4.3.2 Validación conceptual de cobertura RF.....	33
4.4. Arquitectura lógica y segmentación por VLAN.....	34
4.5. Plan de direccionamiento IP con VLSM.....	36
4.6. Asignación de interfaces del nodo de núcleo.....	37
4.7. Gestión del tráfico y conmutación automática.....	37
4.7.1 Estimación de disponibilidad y tiempos de convergencia.....	38
4.8. Esquema de Calidad de Servicio.....	40
4.9. Capa de seguridad.....	40
4.10. Modelo funcional de la aplicación móvil colaborativa.....	41
4.11. Simulación del diseño en Cisco Packet Tracer.....	42
4.11.1. Topología del modelo.....	42
Conclusiones.....	46
Recomendaciones.....	49
Recomendaciones para la organización / sector estudiado.....	49
Recomendaciones para futuras investigaciones.....	49
Alianzas interinstitucionales.....	50
Referencias bibliográficas.....	52
Anexos.....	56
Anexo A. Registro de Prompts.....	56
Anexo B. Datos de accidentes de tránsito.....	57
Anexo C. Instrumento de validación por juicio de expertos.....	58
C.1. Instrucciones para el experto evaluador.....	58
C.2. Datos de identificación del experto.....	58
C.3. Rúbrica de valoración.....	59
C.4. Valoración global del instrumento.....	60
C.6. Declaración.....	61
Anexo D. Prototipo visual de la aplicación móvil colaborativa.....	61
Anexo E. Prototipo visual de la página web institucional.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de los modelos internacionales de referencia	11
Tabla 2. Tecnologías de acceso integradas en el diseño	12
Tabla 3. Estimación de elementos de la infraestructura propuesta	31
Tabla 4. Estimación del tráfico agregado de la red	32
Tabla 5. Segmentación lógica por VLAN y prioridad de tráfico	35
Tabla 6. Plan de direccionamiento IP con VLSM sobre la red 10.0.0.0/8	36
Tabla 7. Asignación de interfaces del router Core	37
Tabla 8. Parámetros de disponibilidad y convergencia estimados.....	39
Tabla 9. Esquema de Calidad de Servicio por clase de tráfico	40
Tabla 10. Distribución total de accidentes de tránsito y víctimas fatales	57
Tabla 11. Información del experto	58
Tabla 12. Instrumento de validación por juicio de expertos	59
Tabla 13. Valoración general del diseño	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Brechas de cobertura identificadas en la Autopista Panamá–Colón	29
Figura 2. Arquitectura general de tres niveles de la red propuesta.....	33
Figura 3. Postes IoT junto a vehículos no V2X y con V2X.....	33
Figura 4. Modelo dual de separación de postes	34
Figura 5. Topología de la red simulada en Cisco Packet Tracer	43
Figura 6. Vista simplificada de la red en toda la Autopista Panamá–Colón	43
Figura 7. Configuración de VLAN en el switch del poste inteligente	44
Figura 8. Pantalla principal de navegación con integración V2X	62
Figura 9. Modo conducción activa con alertas V2X en tiempo real	63
Figura 10. Módulo de reporte colaborativo de incidentes	63
Figura 11. Panel de estado de la red y capa transversal de seguridad	64
Figura 12. Perfil del conductor y sistema de participación colaborativa	65
Figura 13. Página principal del portal Canal V2X	66
Figura 14. Módulos de seguridad, gamificación e infraestructura.....	67

LISTA DE SIGLAS

- 3GPP: Third Generation Partnership Project (Proyecto de Asociación de Tercera Generación)
- ASEP: Autoridad Nacional de los Servicios Públicos
- ATTT: Autoridad del Tránsito y Transporte Terrestre
- C-ITS: Cooperative Intelligent Transport Systems (Sistemas Cooperativos de Transporte Inteligente)
- CLI: Command Line Interface (Interfaz de Línea de Comandos)
- C-V2X: Cellular Vehicle-to-Everything (V2X celular)
- DSCP: Differentiated Services Code Point (Punto de Código de Servicios Diferenciados)
- ENA: Empresa Nacional de Autopistas
- ETSI: European Telecommunications Standards Institute (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones)
- HSRP: Hot Standby Router Protocol (Protocolo de Enrutador de Reserva en Caliente)
- IDS/IPS: Intrusion Detection System / Intrusion Prevention System (Sistema de Detección / Prevención de Intrusiones)
- IoT: Internet of Things (Internet de las Cosas)
- IP: Internet Protocol (Protocolo de Internet)
- LPWAN: Low-Power Wide-Area Network (Red de Área Amplia y Baja Potencia)
- LTE: Long Term Evolution (Evolución a Largo Plazo)
- MOP: Ministerio de Obras Públicas
- OSPF: Open Shortest Path First (Primero la Ruta más Corta Abierta)
- PKI: Public Key Infrastructure (Infraestructura de Clave Pública)
- QoS: Quality of Service (Calidad de Servicio)
- RSU: Roadside Unit (Unidad de Borde de Carretera)
- RTO: Recovery Time Objective (Tiempo Objetivo de Recuperación)
- SD-WAN: Software-Defined Wide Area Network (Red de Área Amplia Definida por Software)

- TMC: Traffic Management Center (Centro de Gestión de Tránsito)
- UNICyT: Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología
- V2I: Vehicle-to-Infrastructure (Vehículo a Infraestructura)
- V2N: Vehicle-to-Network (Vehículo a Red)
- V2P: Vehicle-to-Pedestrian (Vehículo a Peatón)
- V2V: Vehicle-to-Vehicle (Vehículo a Vehículo)
- V2X: Vehicle-to-Everything (Vehículo a Todo)
- VLAN: Virtual Local Area Network (Red de Área Local Virtual)
- VLSM: Variable Length Subnet Mask (Máscara de Subred de Longitud Variable)
- VRRP: Virtual Router Redundancy Protocol (Protocolo de Redundancia de Enrutador Virtual)
- WAVE: Wireless Access in Vehicular Environments (Acceso Inalámbrico en Entornos Vehiculares)



REPÚBLICA DE PANAMÁ

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y TECNOLOGÍA

**DISEÑO DE UNA RED DE COMUNICACIONES REDUNDANTE Y SEGURA PARA
LA AUTOPISTA INTELIGENTE PANAMÁ-COLÓN**

Autor (a): Gerardo Llorente

Tutor (a): José Munive

Año: 2026

RESUMEN

La Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta), eje logístico clave del país, presenta zonas de atenuación severa o pérdida total de señal móvil debido a su topografía accidentada y densa vegetación, complicando un escenario de alta siniestralidad. Este proyecto diseñó una red de comunicaciones redundante y segura para dicha Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta), integrando múltiples tecnologías de acceso con conmutación automática, una capa transversal de seguridad y una aplicación colaborativa para vehículos modernos y antiguos. Enmarcado en la investigación proyectiva bajo la modalidad de Proyecto Factible, el estudio empleó revisión documental, observación de campo y análisis comparativo de referentes internacionales como C-ITS, K-City y C-Roads. El diseño se validó mediante simulaciones en Cisco Packet Tracer, verificando la segmentación VLAN, redundancia HSRP, convergencia OSPF y direccionamiento VLSM. Los hallazgos confirman la viabilidad de una arquitectura de postes inteligentes autónomos (energía solar), radios LTE/5G y LoRaWAN, fibra óptica soterrada y Calidad de Servicio. Se concluye que la solución es técnica y socialmente pertinente.

Palabras clave: redes redundantes; seguridad de redes; V2X; transporte inteligente; Calidad de Servicio; Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta).



**REPUBLIC OF PANAMA
INTERNATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
FACULTY OF COMPUTER SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**DESIGN OF A REDUNDANT AND SECURE COMMUNICATIONS NETWORK FOR
THE PANAMA–COLÓN SMART HIGHWAY**

Author (a): Gerardo Llorente

Tutor (a): José Munive

Year: 2026

ABSTRACT

The Panama–Colón highway is a key logistics route, but it has areas with poor or no mobile signal due to the rough terrain and dense vegetation, which makes accidents more likely. This project designed a secure and redundant communication network for the highway. It uses automatic connection switching, a strong security layer, and a collaborative app for all types of vehicles. This study was a feasible project based on document research, field observations, and a comparison with international systems like C-ITS, K-City, and C-Roads. We validated the design using Cisco Packet Tracer simulations, testing VLAN segmentation, HSRP redundancy, OSPF routing, and VLSM addressing. The results show that an architecture with solar-powered smart poles, LTE/5G and LoRaWAN radios, underground fiber optics, and Quality of Service (QoS) is possible. The solution is technically feasible and socially useful.

Keywords: redundant networks, network security, V2X, intelligent transportation, Quality of Service, Panamá–Colón highway.

INTRODUCCIÓN

La conectividad de las vías terrestres ha dejado de ser un servicio accesorio para convertirse en un componente crítico de la seguridad vial, la gestión del tránsito y la logística nacional. El despliegue de los Sistemas Cooperativos de Transporte Inteligente (en inglés, Cooperative Intelligent Transport Systems o C-ITS) y de las comunicaciones vehículo a todo (en inglés, Vehicle-to-Everything o V2X) ha demostrado, en diversas latitudes, que una infraestructura de comunicaciones confiable es capaz de reducir la siniestralidad, optimizar los flujos vehiculares y habilitar servicios de información en tiempo real para los conductores. Las carreteras inteligentes ya no constituyen una promesa futurista: son una realidad operativa en Europa y Asia, y un horizonte alcanzable para América Latina en la medida en que se diseñen infraestructuras adecuadas a sus condiciones particulares.

En la República de Panamá, la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) constituye uno de los ejes viales más estratégicos: enlaza la capital con el litoral atlántico y con la zona logística de mayor movimiento del país, articulando el tránsito de carga asociado al Canal de Panamá, a la Zona Libre de Colón y a los puertos de ambos océanos. No obstante, a lo largo de su trazado persisten zonas en las que la señal de los servicios móviles experimenta atenuación severa o pérdida total, condición atribuible a la topografía accidentada y a la densa cobertura vegetal de la región. A ello se suma una demanda de tránsito sostenida y una siniestralidad elevada que dimensionan la urgencia de intervenir la conectividad de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta).

El presente Proyecto de Graduación aborda esta problemática mediante el diseño de una red de comunicaciones redundante y segura para la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta). La propuesta integra múltiples tecnologías de acceso —LTE/5G, redes de área amplia y baja potencia (en inglés, Low-Power Wide-Area Network o LPWAN) basadas en LoRaWAN, y fibra óptica soterrada como troncal— sobre postes inteligentes autónomos con alimentación solar, articuladas mediante mecanismos de conmutación automática ante fallas (en inglés, failover). El diseño incorpora, de manera

transversal, una capa de seguridad de la información alineada con estándares internacionales, así como una aplicación móvil colaborativa y página web que habilita la participación equitativa de vehículos modernos con capacidades V2X y de vehículos antiguos que carecen de ellas.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo se inscribe en el paradigma de la investigación proyectiva, bajo la modalidad de Proyecto Especial o Factible. La validación del diseño se efectúa por medio de la simulación de la red en la herramienta Cisco Packet Tracer, que permite verificar el comportamiento funcional de la segmentación por VLAN, la redundancia de pasarela, la convergencia del enrutamiento dinámico y el plan de direccionamiento jerárquico. El trabajo se concibe como una propuesta conceptual; su validación mediante juicio de expertos se plantea como una etapa futura, una vez avanzado el diseño hacia su eventual implementación.

El documento se organiza en cuatro capítulos. El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, los antecedentes, la formulación de las interrogantes, los objetivos, la justificación, el alcance y la línea de investigación del estudio. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, que comprende los antecedentes internacionales, las bases teóricas de las tecnologías involucradas, el marco normativo y la definición de los términos básicos. El Capítulo III expone el marco metodológico, con el tipo y enfoque, el diseño por fases, las técnicas e instrumentos, la justificación de la herramienta de simulación, las técnicas de análisis y las consideraciones éticas. El Capítulo IV integra los resultados, el análisis y la propuesta de diseño en sus dimensiones física, lógica, de direccionamiento, de gestión del tráfico, de seguridad y de inclusión tecnológica, junto con la simulación en Cisco Packet Tracer. Finalmente, se ofrecen las conclusiones y las recomendaciones como apartados independientes, seguidas de las referencias bibliográficas y los anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Capítulo I. Planteamiento del problema

Este capítulo delimita el problema que motiva la investigación. Se presenta primero el planteamiento del problema con su evidencia documental, seguido de los antecedentes, la formulación en términos interrogativos, los objetivos general y específicos, la justificación en sus cuatro dimensiones, el alcance con sus delimitaciones, y la línea de investigación a la que se adscribe el trabajo.

1.1. Planteamiento del problema

La Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) se erige como uno de los ejes logísticos más relevantes del país. Sin embargo, a lo largo de su trazado persisten zonas en las que la señal de los servicios móviles experimenta atenuación severa o pérdida total, situación atribuible a la topografía accidentada y a la densa cobertura vegetal de la región. Buena parte de su recorrido discurre por zonas de selva tropical y cortes de roca en las que no se dispone de tendido eléctrico convencional, lo que impone retos técnicos específicos en materia de alimentación y mantenimiento para cualquier infraestructura de red que se proyecte.

A esta condición técnica se suma una demanda de tránsito sostenida. El parque vehicular nacional rebasó el millón y medio de unidades hacia noviembre de 2022 (Autoridad del Tránsito y Transporte Terrestre, citada en La Estrella de Panamá, 2023), mientras que la provincia de Colón registró dos mil ciento sesenta y cuatro (2,164) accidentes de tránsito en el período enero–octubre de 2024 (Panamá América, 2024). En este contexto, la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP) ya ha intervenido un tramo de diez (10) kilómetros de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) con la finalidad de fortalecer la cobertura del servicio de telefonía celular (ASEP, 2024), lo cual confirma la pertinencia institucional de abordar la conectividad de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta).

La ausencia de una conectividad continua y confiable impide el despliegue de servicios de seguridad vial basados en comunicaciones V2X y C-ITS, que en otras latitudes han demostrado capacidad para reducir la siniestralidad y optimizar la gestión del tránsito. Más aún, la dependencia de una única tecnología de acceso o de un único

operador expone a la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) a interrupciones totales del servicio ante la falla de un enlace, un nodo o una fuente de energía. Un incidente vial ocurrido en una zona sin cobertura puede demorar la activación de los servicios de emergencia, prolongar los tiempos de atención y, en consecuencia, agravar las consecuencias humanas y materiales del siniestro.

El vacío que el presente estudio busca atender es, por tanto, la ausencia de un diseño de red concebido desde su origen con redundancia multitecnología, seguridad transversal e inclusión de los vehículos que aún no cuentan con capacidades de comunicación nativas. El trabajo atiende ese vacío mediante una propuesta de diseño integral, validada funcionalmente por simulación, que sienta las bases técnicas para una eventual implementación por etapas.

1.2. Antecedentes del problema

La preocupación por la conectividad de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) no es nueva. La intervención de diez kilómetros ejecutada por la ASEP (2024) sobre la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) constituye el antecedente institucional más directo: evidencia el reconocimiento estatal de las brechas de cobertura y un primer esfuerzo por mitigarlas, aunque limitado a un tramo y a una sola tecnología de acceso. Este antecedente aporta al presente trabajo la confirmación de que el problema es real, reconocido y susceptible de intervención.

En el plano internacional, la plataforma C-Roads ha coordinado el despliegue armonizado de servicios C-ITS en Europa, demostrando que la combinación de comunicaciones dedicadas y celulares permite sostener servicios de seguridad vial de forma interoperable entre países (C-Roads Platform, 2020). El proyecto K-City de Corea del Sur, por su parte, constituye un banco de pruebas de escala real (escala humana promedio) donde se validan tecnologías 5G y C-V2X antes de su despliegue comercial. Ambos antecedentes aportan a este trabajo modelos de arquitectura, redundancia y validación previa que se trasladan, a escala de simulación, al contexto panameño.

Finalmente, la literatura técnica sobre redes vehiculares, el uso de LTE para entornos vehiculares (Araniti et al., 2013), los servicios V2X sobre LTE y 5G (Chen et al., 2017) y la evolución de las tecnologías de acceso radioeléctrico (Naik et al., 2019) constituye el antecedente conceptual que sustenta las decisiones tecnológicas del diseño propuesto.

1.3. Formulación del problema

Pregunta principal

¿De qué forma puede diseñarse una red de comunicaciones redundante y segura para la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta), que sostenga la conectividad ininterrumpida en la totalidad de su trazado a partir de la combinación de múltiples tecnologías de acceso con conmutación automática ante fallas, una capa complementaria de seguridad de la información, una página web a modo de presentación y una aplicación móvil colaborativa que habilite la participación equitativa tanto de vehículos modernos con capacidades V2X como de vehículos antiguos que carecen de ellas?

Preguntas secundarias

- ¿Cuáles son las brechas de cobertura, los puntos críticos de falla y los tramos sin tendido eléctrico que presenta la red actual de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta), y qué buenas prácticas ofrecen los referentes internacionales aplicables a Panamá?
- ¿Qué arquitectura física y lógica permite integrar LTE/5G, LoRaWAN y fibra óptica soterrada con conmutación automática y energía autónoma a lo largo del trazado, incluyendo un plan de direccionamiento IP jerárquico?
- ¿Qué capa de seguridad y qué modelo funcional de aplicación móvil colaborativa garantizan la integridad, la autenticidad y la inclusión tecnológica de la solución?
- ¿En qué medida el diseño propuesto satisface el comportamiento funcional esperado de segmentación, redundancia y enrutamiento, según la simulación en Cisco Packet Tracer?

1.4. Objetivos de la investigación

Objetivo general

Diseñar una red de comunicaciones redundante y segura para la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta), sustentada en la integración de múltiples tecnologías de acceso con conmutación automática entre enlaces, complementada por una capa transversal de seguridad de la información y por una aplicación móvil colaborativa que habilite la participación de vehículos modernos y antiguos.

Objetivos específicos

- Diagnosticar la red actual de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta), brechas de cobertura, puntos críticos de falla y tramos sin tendido eléctrico, y compararla con los modelos de referencia C-ITS (Países Bajos, Alemania, Austria), K-City (Corea del Sur) y C-Roads (España), identificando buenas prácticas de arquitectura, redundancia y disponibilidad aplicables a Panamá.
- Diseñar la arquitectura lógica y física integrando LTE/5G, LPWAN basada en LoRaWAN y fibra óptica soterrada como red troncal, sobre postes inteligentes autónomos con alimentación solar, incluyendo un plan de direccionamiento IP jerárquico con máscaras de longitud variable (VLSM).
- Definir la gestión del tráfico con conmutación automática mediante HSRP, OSPF y SD-WAN, aplicando Calidad de Servicio que priorice la seguridad vial sobre el entretenimiento.
- Definir la capa de seguridad, cifrado extremo a extremo, PKI, VLAN, IDS/IPS e ISO/IEC 27001 e ISO/SAE 21434, y el modelo funcional de una aplicación móvil colaborativa que integre datos de la infraestructura y de los usuarios, incluidos los vehículos sin V2X nativo.
- Validar funcionalmente el diseño mediante simulación en Cisco Packet Tracer, verificando el comportamiento de la segmentación, la redundancia de pasarela y el enrutamiento dinámico.

1.5. Justificación de la investigación

Justificación académica

El proyecto le permite al sustentante articular los conocimientos adquiridos en las asignaturas de Arquitectura y Diseño de Redes, Planificación e Instalación de Redes,

Calidad de Servicio (en inglés, Quality of Service o QoS), Solución de Problemas en Redes de Protocolo de Internet (en inglés, Internet Protocol o IP) y Seguridad en Redes de Comunicaciones. La propuesta adopta como marco de referencia los estándares V2X y las experiencias internacionales de C-ITS, K-City y C-Roads, y aporta evidencia funcional replicable que puede servir de base a futuros trabajos académicos sobre redes viales en el contexto panameño.

Justificación social

La propuesta incorpora dos aportes diferenciadores de impacto social directo. En primer lugar, la conmutación automática entre enlaces redundantes garantiza la continuidad del servicio, condición indispensable para que las alertas de seguridad vial lleguen a tiempo a los usuarios de la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta), beneficiando a los miles de conductores que la transitan a diario. En segundo lugar, la inclusión tecnológica viabilizada por una aplicación móvil colaborativa, con un enfoque similar al de Waze, permite que los conductores de vehículos antiguos, carentes de capacidades V2X nativas en un momento en que el ecosistema V2X en el país está dando sus primeros pasos, accedan igualmente a los servicios de la plataforma desde su teléfono inteligente, de modo que el beneficio de la carretera inteligente no quede restringido a quienes pueden adquirir vehículos de última generación.

Justificación profesional

El ejercicio contribuye al perfil del egresado de la Maestría, dado que consolida competencias en el diseño de arquitecturas multitecnología, en la gestión de la Calidad de Servicio, en la formulación de capas de seguridad alineadas con estándares internacionales y en la aplicación del enfoque de Confianza Cero (en inglés, Zero Trust) a infraestructuras críticas, competencias actualmente demandadas por el mercado nacional en telecomunicaciones, transporte inteligente y resguardo de infraestructura crítica.

Justificación institucional

El trabajo se vincula con la misión de la UNICyT de formar profesionales capaces de aportar soluciones tecnológicas a problemas nacionales, y se adscribe a la línea de investigación de redes de comunicaciones y seguridad de la información en

infraestructuras críticas, atendiendo un problema de relevancia para la infraestructura vial y logística del país.

1.6. Alcance y delimitación del proyecto

La presente propuesta se desarrolla, de manera exclusiva, como un ejercicio académico-investigativo sobre la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta), cuya longitud aproximada es de cincuenta y ocho (58) kilómetros o treinta y seis (36 millas). Esta Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta) es administrada por la Concesionaria Madden-Colón y está diseñada con estándares de vía de alta velocidad de hasta 120 km/h (Ministerio de Obras Públicas, 2015). El estudio se limita estrictamente a esta Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta) de peaje, excluyendo explícitamente la Carretera Transístmica Boyd-Roosevelt u otras vías secundarias de la región.

En el plano geográfico, el estudio se circunscribe únicamente al trazado de dicha Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta) entre las provincias de Panamá y Colón. En el plano temporal, el diagnóstico y el diseño se desarrollan durante el período académico del proyecto (2025–2026). En el plano conceptual, el estudio comprende el diseño de la red en sus dimensiones física, lógica, de direccionamiento, de gestión del tráfico, de seguridad y de inclusión tecnológica. En el plano metodológico, la validación se efectúa mediante simulación funcional en Cisco Packet Tracer.

No contempla la implementación física del sistema, la adquisición de equipos ni la ejecución de obras civiles, por corresponder a la modalidad de Proyecto Especial o Factible. Entre las delimitaciones se encuentran la disponibilidad de información comercialmente sensible de la empresa administradora de la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta); la naturaleza simulada de los escenarios de validación, cuyos resultados constituyen estimaciones de diseño y no mediciones de campo de un sistema desplegado; y el alcance funcional de la herramienta de simulación seleccionada, que modela el comportamiento de protocolos y configuraciones de red, pero no reproduce fenómenos de propagación radioeléctrica ni la dinámica del tránsito

vehicular, aspectos que se reservan para estudios posteriores con herramientas especializadas.

1.7. Línea de investigación

El trabajo se adscribe a la línea institucional de investigación: Redes de comunicaciones y seguridad de la información en infraestructuras críticas, en correspondencia con el programa de Maestría en Redes de Comunicaciones con énfasis en Seguridad de la Facultad de Ciencias de la Computación y Tecnología de la UNICyT. Esta línea es coherente con la consignada en el resumen, el abstract, la carta de aprobación del tutor y el informe de actividades de tutoría.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Capítulo II. Marco teórico

Este capítulo presenta el sustento conceptual del proyecto. Se exponen primero los antecedentes internacionales en materia de transporte inteligente, seguidos de las bases teóricas de las tecnologías que integran el diseño, comunicaciones vehiculares, tecnologías de acceso, redundancia, Calidad de Servicio, seguridad de la información, postes inteligentes autónomos, direccionamiento jerárquico (VLSM) y simulación de redes, las bases legales y normativas aplicables, y la definición de los términos básicos empleados a lo largo del documento.

2.1. Antecedentes de la investigación

Las experiencias internacionales en transporte inteligente ofrecen referentes valiosos para el diseño de redes de carretera redundantes y seguras. La plataforma C-Roads, que armoniza el despliegue de C-ITS en Europa, ha promovido servicios cooperativos interoperables entre Estados miembros, con especial énfasis en la seguridad vial (C-Roads Platform, 2020). En paralelo, los estándares europeos definidos por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) establecen la arquitectura de comunicaciones de los sistemas de transporte inteligente (ETSI, 2019), y la literatura especializada documenta la evolución de los estándares cooperativos en Europa (Festag, 2014).

Países Bajos, Alemania y Austria han desarrollado Corredores C-ITS transfronterizos que demuestran la viabilidad de servicios armonizados sobre tecnologías híbridas de acceso. Estas iniciativas evidencian que la combinación de comunicaciones dedicadas de corto alcance con redes celulares comerciales permite cubrir tanto los servicios de baja latencia, alertas de colisión, vehículo detenido, obras en la vía, como los servicios de información general. Por su parte, el proyecto K-City de Corea del Sur constituye un entorno de pruebas de escala real que valida tecnologías 5G y C-V2X en condiciones controladas antes de su despliegue comercial, práctica que el presente trabajo traslada al plano de la simulación.

La literatura técnica respalda la convergencia de estas tecnologías: el uso de LTE para redes vehiculares (Araniti et al., 2013), los servicios V2X soportados por sistemas

LTE y 5G (Chen et al., 2017) y la evolución de las tecnologías de acceso radioeléctrico para V2X (Naik et al., 2019). En el ámbito regional, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2021) ha documentado el estado del arte y las oportunidades de los sistemas inteligentes de transporte en la región, lo que permite contextualizar la propuesta más allá de los referentes europeos y asiáticos, y subraya la pertinencia de soluciones adaptadas a las condiciones presupuestarias y geográficas latinoamericanas.

Tabla 1

Comparación de los modelos internacionales de referencia

Modelo / país	Tecnologías de acceso	Redundancia / disponibilidad	Buenas prácticas aplicables
C-ITS (Países Bajos, Alemania, Austria)	ITS-G5 (IEEE 802.11p) y celular híbrido	Corredores transfronterizos con servicios armonizados	Estandarización ETSI ITS e interoperabilidad transfronteriza
K-City (Corea del Sur)	5G, C-V2X y sensores de campo	Entorno de pruebas controlado de alta disponibilidad	Banco de pruebas para validar antes de desplegar
C-Roads (España)	ITS-G5 y celular (híbrido)	Despliegue por fases con servicios prioritarios de seguridad	Priorización del tráfico de seguridad vial y despliegue gradual

Nota. Elaboración propia con base en C-Roads Platform (2020), ETSI (2019) y Festag (2014).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Comunicaciones vehiculares y V2X

Las comunicaciones vehículo a todo (V2X) abarcan los intercambios entre vehículos (V2V), entre vehículo e infraestructura (V2I), entre vehículo y peatón (V2P) y entre vehículo y red (V2N). Existen dos familias tecnológicas principales: la basada en IEEE 802.11p / WAVE (Acceso Inalámbrico en Entornos Vehiculares) y la basada en comunicaciones celulares C-V2X definidas por el 3GPP (3rd Generation Partnership Project o Proyecto de Asociación de Tercera Generación). Los requisitos de servicio para escenarios V2X mejorados quedan establecidos en la especificación 3GPP TS 22.186 (3GPP, 2020), mientras que la evolución hacia IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers o Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) 802.11bd y 5G

NR (New Radio o Nueva Radio) V2X amplía el alcance, la fiabilidad y la latencia de estas comunicaciones (Naik et al., 2019).

En el contexto del presente diseño, las comunicaciones V2I se materializan a través de las unidades de borde de carretera (en inglés, Roadside Units o RSU) instaladas sobre los postes inteligentes, que actúan como puntos de intercambio entre los vehículos en tránsito y la infraestructura fija. Las comunicaciones V2N, por su parte, se canalizan a través de la red celular comercial y de la aplicación móvil colaborativa, lo que permite extender los servicios a los vehículos que carecen de equipamiento V2X de fábrica.

2.2.2. Tecnologías de acceso

El diseño integra tres tecnologías complementarias. LTE/5G aporta gran ancho de banda y baja latencia para el tráfico de seguridad vial y de usuario en zonas con cobertura comercial. LoRaWAN (protocolo de red inalámbrica para el internet de las cosas [IoT]), perteneciente a la familia LPWAN (Low-Power Wide Area Network o Red de Área Amplia de Baja Potencia), ofrece largo alcance y bajo consumo a costa de una baja tasa de transferencia, lo que la hace idónea como respaldo para telemetría y alertas críticas en tramos sin cobertura celular (LoRa Alliance, 2020). La fibra óptica soterrada constituye la red troncal de alta capacidad que interconecta los nodos y los enlaza con los centros de gestión.

Tabla 2

Tecnologías de acceso integradas en el diseño

Tecnología	Rol en el diseño	Fortalezas	Limitaciones
Fibra óptica soterrada	Troncal	Alta capacidad y baja latencia	Costo de obra civil; vulnerable a cortes puntuales
LTE/5G	Acceso primario	Ancho de banda y latencia adecuados para V2X	Cobertura comercial limitada en la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta)
LoRaWAN (LPWAN)	Respaldo de baja velocidad	Largo alcance y bajo consumo	Baja tasa de transferencia

Nota. Elaboración propia con base en Araniti et al. (2013), Chen et al. (2017) y LoRa Alliance (2020).

2.2.3. Redundancia y alta disponibilidad

La continuidad del servicio se sustenta en protocolos de redundancia de pasarela y enrutamiento. El Protocolo de Enrutador de Reserva en Caliente (en inglés, Hot Standby Router Protocol o HSRP) proporciona una pasarela virtual que sobrevive a la falla de un equipo: dos o más enrutadores comparten una dirección IP virtual, de modo que los dispositivos finales mantienen su puerta de enlace aun cuando el equipo activo deje de operar. En HSRP, el enrutador con mayor prioridad asume el rol activo, mientras el de menor prioridad permanece en espera; el mecanismo de apropiación (en inglés, preempt) garantiza que, al recuperarse el equipo principal, este retome el control de la pasarela. Se optó por HSRP, protocolo propietario de Cisco, en lugar de su equivalente estándar VRRP (Virtual Router Redundancy Protocol), dado que la totalidad de los equipos de la arquitectura propuesta corresponde a la plataforma Cisco; VRRP quedaría reservado para un escenario de interoperabilidad multifabricante, fuera del alcance del presente diseño.

El protocolo Primero la Ruta más Corta Abierta (en inglés, Open Shortest Path First u OSPF) ofrece convergencia dinámica del enrutamiento ante cambios de topología, recalculando las rutas disponibles cuando un enlace o un nodo deja de responder. La Red de Área Amplia Definida por Software (en inglés, Software-Defined Wide Area Network o SD-WAN) permite seleccionar de forma inteligente el mejor enlace disponible y conmutar automáticamente entre tecnologías de acceso según políticas de aplicación y desempeño. La métrica fundamental de estos mecanismos es el Tiempo Objetivo de Recuperación (RTO): el lapso máximo tolerable entre la ocurrencia de la falla y el restablecimiento del servicio.

El diseño adopta como referencia la arquitectura Cisco SD-WAN (basada en la tecnología Viptela), estructurada en tres planos: el plano de gestión, a cargo del controlador vManage, que centraliza la configuración y las políticas de calidad de servicio; el plano de control, a cargo de vSmart, que distribuye las políticas de enrutamiento y de selección de ruta a los enrutadores de borde; y el plano de orquestación, a cargo de vBond, que autentica y vincula los enrutadores al overlay. Los enrutadores de borde (cEdge, sobre IOS-XE) se ubican en el Core, en el TMC y en los

puntos de agregación de cada zona (RSU-Z1, RSU-Z2, RSU-Z3), estableciendo túneles IPsec sobre el overlay sin importar el transporte físico subyacente. El underlay está compuesto por los tres transportes ya descritos —fibra óptica soterrada, LTE/5G y LoRaWAN—, cada uno actuando como un circuito de acceso independiente. Las políticas de selección de ruta, definidas centralmente en vManage, priorizan el tráfico de la VLAN 10 (vehicular V2X) sobre el enlace de menor latencia disponible en cada instante.

Nota: los enrutadores ISR4331 previstos para el despliegue real sí son compatibles con Cisco SD-WAN sobre IOS-XE; los routers 2911 empleados en el entorno de Packet Tracer se utilizan únicamente como referencia de conectividad básica (VLAN, OSPF, HSRP), dado que la herramienta no soporta la simulación de SD-WAN.

2.2.4. Calidad de Servicio (QoS)

La Calidad de Servicio permite clasificar y priorizar el tráfico de manera que las comunicaciones de seguridad vial reciban tratamiento preferente frente al tráfico de entretenimiento o de gestión no crítica. Mediante el marcado con Puntos de Código de Servicios Diferenciados (en inglés, Differentiated Services Code Point o DSCP), el encolamiento diferenciado y las políticas de descarte selectivo, el diseño asegura que las alertas de colisión, las notificaciones de incidentes y la telemetría crítica mantengan baja latencia y baja pérdida de paquetes incluso en condiciones de congestión. La clase de máxima prioridad recibe el marcado de Reenvío Acelerado (EF, valor DSCP 46), reservado para el tráfico V2X de seguridad, mientras que las clases de gestión, usuario y entretenimiento reciben marcados de Reenvío Asegurado (AF) y Mejor Esfuerzo (BE) en orden decreciente de prioridad.

2.2.5. Seguridad de la información

La capa de seguridad atraviesa el diseño de manera transversal bajo el enfoque de Confianza Cero, que parte del principio de no asumir confianza implícita en ningún usuario, dispositivo o segmento de red. Comprende el cifrado de extremo a extremo, la autenticación mediante Infraestructura de Clave Pública (en inglés, Public Key Infrastructure o PKI), la segmentación por Redes de Área Local Virtuales (en inglés, Virtual Local Area Network o VLAN) para aislar los dominios críticos del tráfico de

usuario, y los sistemas de detección y prevención de intrusiones (en inglés, Intrusion Detection System / Intrusion Prevention System o IDS/IPS). El marco se alinea con las normas ISO/IEC 27001 de gestión de la seguridad de la información e ISO/SAE 21434 de ingeniería de ciberseguridad para vehículos de carretera (International Organization for Standardization, 2022).

2.2.6. Postes inteligentes autónomos

Ante la ausencia de tendido eléctrico convencional en gran parte del trazado, el diseño contempla postes inteligentes autónomos equipados con paneles solares, banco de baterías de litio y gabinete de grado industrial preparado para clima tropical. Cada poste aloja múltiples radios de acceso (LTE/5G y LoRaWAN), cámaras de videovigilancia, luminaria eficiente y sensores meteorológicos básicos, y se interconecta con la troncal de fibra y con los postes vecinos mediante un mecanismo de salto inalámbrico que garantiza la continuidad del tráfico crítico ante la falla de un nodo. El poste inteligente constituye, así, la unidad modular y replicable del diseño: cada uno opera como un nodo de red completo, con su propio switch de acceso, sus dispositivos de campo y su autonomía energética.

2.2.7. Direccionamiento jerárquico y VLSM

El diseño de un plan de direccionamiento IP escalable constituye un requisito estructural de toda red de gran extensión geográfica. La técnica de Máscara de Subred de Longitud Variable (en inglés, Variable Length Subnet Mask o VLSM) permite asignar a cada segmento únicamente el espacio de direcciones que su población de dispositivos requiere, evitando el desperdicio inherente a los esquemas de máscara fija. En una red vial, donde coexisten subredes de gran densidad, los vehículos en tránsito asociados a cada zona de cobertura, con subredes pequeñas y estables, los equipos fijos de cada poste, y con enlaces punto a punto entre enrutadores, el VLSM hace posible un plan jerárquico, resumible y geográficamente ordenado, condición que simplifica el enrutamiento y el diagnóstico de fallas.

2.2.8. Simulación de redes como técnica de validación

La simulación de redes constituye una técnica de validación ampliamente aceptada en el ámbito académico y profesional, que permite verificar el

comportamiento funcional de un diseño antes de comprometer recursos en su implementación física. Cisco Packet Tracer es una herramienta de simulación y visualización de redes desarrollada por Cisco Systems en el marco de su programa académico Networking Academy, que modela el comportamiento de equipos de conmutación y enrutamiento reales, su interfaz de línea de comandos (CLI) con el sistema operativo IOS, y un conjunto creciente de dispositivos de Internet de las Cosas (IoT), incluidos sensores, cámaras, luminarias y pasarelas (Cisco Networking Academy, 2023).

2.3. Marco normativo y legal

El diseño y desarrollo de la presente propuesta se fundamentan en un marco regulatorio integral que abarca tanto la normativa nacional vigente en Panamá como los estándares técnicos internacionales, garantizando así la seguridad, privacidad y operatividad de la solución.

2.3.1. Normativa Nacional

Ley 81 de 26 de marzo de 2019 sobre Protección de Datos Personales: Regula el tratamiento, almacenamiento y transferencia de los datos recolectados de los conductores a través de la aplicación móvil colaborativa de la propuesta. Impone restricciones estrictas sobre la anonimización de la ubicación geográfica de los vehículos y el consentimiento informado de los usuarios.

Regulaciones de la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP, 2024): Marco legal que rige el uso y la atribución del espectro radioeléctrico en el territorio panameño. Delimita las bandas de frecuencia permitidas para el despliegue de las tecnologías LoRaWAN (bandas libres ISM) y los parámetros de interconexión con las redes públicas de telecomunicaciones de los operadores celulares móviles (LTE/5G).

2.3.2. Normativa y Estándares Internacionales

ISO/IEC 27001:2022 (Sistemas de Gestión de Seguridad de la Información): Estándar internacional que define los controles criptográficos, la gestión de

vulnerabilidades y los requisitos de resiliencia operativa aplicados a la capa de seguridad de la red troncal y lógica del diseño.

ISO/SAE 21434:2021 (Road vehicles — Cybersecurity engineering): Norma técnica que regula las directrices de ciberseguridad aplicadas al desarrollo de sistemas de comunicación y procesamiento de datos embebidos en el entorno de vehículos de carretera y su interacción con las infraestructuras de transporte inteligentes.

Especificaciones Técnicas 3GPP TS 22.186 (V16.0.0, 2020): Estándar global de telecomunicaciones que dicta los requisitos de rendimiento, disponibilidad y latencia obligatorios para habilitar de manera segura los servicios de comunicación V2X mejorados sobre plataformas LTE y 5G.

2.4. Definición de términos básicos

- Conmutación automática (Failover): Mecanismo de alta disponibilidad mediante el cual, ante la interrupción de un enlace o equipo, el tráfico es transferido de manera inmediata a un recurso de respaldo sin intervención humana (Tanenbaum & Wetherall, 2021). En este trabajo, se emplea para asegurar la continuidad operativa de los nodos de comunicación vial ante fallas críticas de hardware.
- HSRP (Hot Standby Router Protocol): Protocolo de redundancia de primer salto que permite a dos o más enrutadores compartir una dirección IP virtual de pasarela, garantizando que la falla del dispositivo activo sea absorbida por el equipo en espera (Cisco Systems, 2023). Se implementa para asegurar la disponibilidad de la puerta de enlace en las RSU principales.
- OSPF (Open Shortest Path First): Protocolo de enrutamiento dinámico de estado de enlace que utiliza el algoritmo de Dijkstra para recalculan las rutas de la red ante cambios en la topología, definido bajo el estándar RFC 2328 (Moy, 1998). Es el protocolo base para la convergencia y enrutamiento inteligente entre los postes autónomos.
- Packet Tracer: Entorno de simulación y visualización de redes desarrollado por Cisco, utilizado para modelar el comportamiento de equipos, protocolos y

dispositivos IoT (Cisco Networking Academy, 2023). En este estudio, funciona como la plataforma principal para la validación funcional del diseño lógico antes de su despliegue físico.

- Poste inteligente autónomo: Estructura vial de infraestructura inteligente que integra sistemas de alimentación solar, almacenamiento energético, nodos de computación y radios de acceso. En la presente propuesta, opera como el nodo autosuficiente base para la recolección de datos y conectividad vehicular.
- QoS (Quality of Service): Conjunto de técnicas de clasificación, marcado, encolamiento y descarte selectivo diseñadas para proporcionar un tratamiento diferenciado al tráfico de red según su criticidad (Stallings, 2016). Se utiliza para priorizar los datos de baja latencia requeridos por las comunicaciones V2X sobre el tráfico de gestión ordinario.
- RSU (Roadside Unit): Unidad de comunicaciones instalada al borde de la infraestructura vial que habilita el intercambio de información entre vehículos y la red troncal (ETSI, 2019). Representa el punto de acceso de comunicación directa con los vehículos en tránsito en el sistema propuesto.
- RTO (Recovery Time Objective): Tiempo máximo tolerable entre la ocurrencia de una falla y el restablecimiento completo del servicio (ISO/IEC, 2022). En este diseño, el RTO define el umbral crítico para la conmutación automática de los enlaces de comunicación vial.
- V2X (Vehicle-to-Everything): Familia de estándares de comunicación que permite el intercambio de datos entre el vehículo y su entorno, incluyendo otros vehículos (V2V), infraestructura (V2I), peatones (V2P) y la red (V2N) (3GPP, 2020). Es el paradigma central de conectividad que articula el funcionamiento de la aplicación móvil y las RSU.
- VLAN (Virtual Local Area Network): Segmento lógico de red de Capa 2 que permite agrupar dispositivos de manera independiente a su ubicación física, aislando dominios de difusión y de seguridad (Kurose & Ross, 2021). Se aplica para segmentar el tráfico de cámaras, sensores y datos de gestión en la red troncal.

- VLSM (Variable Length Subnet Masking): Técnica de direccionamiento IP que permite subdividir una red con máscaras de longitud variable, asignando a cada subred el espacio de direcciones exacto necesario (Odom, 2020). Se utiliza para optimizar la asignación de IPs en la infraestructura de los nodos y evitar el desperdicio de direcciones.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Capítulo III. Marco metodológico

La presente investigación se clasifica como una investigación aplicada, debido a que su propósito fundamental es la resolución de una necesidad técnica específica, el diseño de una red de comunicaciones para infraestructura vial, mediante la aplicación de conocimientos científicos y tecnológicos. Según la taxonomía de Hurtado de Barrera (2010), el estudio se inscribe en la modalidad de investigación proyectiva, dado que plantea una propuesta viable para transformar una situación actual mediante el diseño de una solución estructurada.

En cuanto a su profundidad, es un estudio de tipo proyectivo, orientado a la formulación de una solución técnica factible, sostenida en un diagnóstico previo y en la revisión sistemática de antecedentes y estándares internacionales, sin requerir la implementación física del sistema.

Respecto a sus componentes metodológicos, el estudio se define como una investigación proyectiva con apoyo de datos cuantitativos. Su naturaleza es fundamentalmente cualitativa, en tanto se sustenta en la descripción de procesos, arquitecturas y requisitos normativos; el apoyo cuantitativo se manifiesta en el uso de cifras oficiales de siniestralidad, en la estimación del dimensionamiento y del tráfico de la red, y en la evaluación de parámetros técnicos verificables durante la simulación, sin que ello constituya un análisis estadístico inferencial propio de los enfoques mixtos.

Por su diseño temporal, el estudio es transversal, ya que el diagnóstico de la infraestructura y la validación de la propuesta se efectúan en un único período de observación, recolectando datos sin seguimiento longitudinal. Finalmente, conforme a la manipulación de variables, el diseño es no experimental en su componente de campo, al observar la realidad de la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta) sin intervenirla, y se clasifica como validación funcional por simulación en su componente de verificación técnica, entendida como una prueba de concepto del diseño propuesto.

3.1. Fases de la investigación

El recorrido metodológico se estructura en nueve (9) fases secuenciales con solapamientos lógicos entre fases adyacentes.

Fase 1 - Diagnóstico de la red actual: Revisión documental de informes del Ministerio de Obras Públicas, la Autoridad del Tránsito y Transporte Terrestre, la Empresa Nacional de Autopistas y las operadoras de telecomunicaciones, complementada con observación de campo, con el fin de levantar los puntos de cobertura, los equipos instalados, las condiciones ambientales y los tramos sin tendido eléctrico.

Fase 2 - Estudio comparativo internacional: Análisis de las experiencias C-ITS europeas, el proyecto K-City y la iniciativa C-Roads, con el propósito de extraer los estándares de red aplicables (ETSI ITS, IEEE 802.11p / WAVE y 3GPP C-V2X), así como las arquitecturas, los esquemas de redundancia y las políticas de seguridad documentadas.

Fase 3 - Diseño de la red con redundancia: A partir del diagnóstico y del estudio comparativo se formula la arquitectura lógica y física: postes inteligentes autónomos con paneles solares, banco de baterías de litio y gabinete de grado industrial, dispuestos según el modelo dual de sesenta (60) y ciento veinte (120) metros descrito en la sección 4.3.1, equipados con múltiples radios de acceso (LTE/5G y LoRaWAN) e interconectados por una red troncal de fibra óptica soterrada, sobre la cual se establece el esquema de conmutación automática (HSRP, OSPF y SD-WAN) y el salto inalámbrico entre postes.

Fase 4 - Modelo funcional de la aplicación móvil inclusiva: Especificación de una aplicación móvil colaborativa que actúa como puente entre la infraestructura vial y los conductores de vehículos antiguos, y que recibe y entrega información en tiempo real sobre incidentes, congestión, alertas meteorológicas y eventos reportados por otros conductores, con datos provenientes de cámaras y sensores meteorológicos básicos instalados sobre los postes.

Fase 5 - Capa de seguridad complementaria: Definición de las políticas y los mecanismos de seguridad: cifrado de extremo a extremo, autenticación PKI,

segmentación por VLAN, IDS/IPS y un esquema de Calidad de Servicio que reserve la prioridad máxima al tráfico de seguridad vial, alineados con ISO/IEC 27001 e ISO/SAE 21434.

Fase 6 - Simulación y validación técnica en Cisco Packet Tracer: Construcción del modelo de red en Cisco Packet Tracer y ejecución de escenarios representativos de operación y de falla: (i) verificación de la segmentación por VLAN y de la conectividad entre dominios autorizados; (ii) falla del enrutador activo y conmutación de la pasarela virtual mediante HSRP; y (iii) cambio de topología y reconvergencia del enrutamiento dinámico OSPF. Los aspectos evaluados son la corrección funcional de la configuración, la continuidad del servicio tras la falla inducida y el comportamiento del plan de direccionamiento.

Fase 7 - Evaluación externa: El diseño propuesto contempla, como fase de seguimiento y consolidación, un proceso de validación mediante un panel de expertos. Este ejercicio integrará visiones académicas y del sector telecomunicaciones (con énfasis en infraestructuras críticas y el contexto de Panamá) para refinar los alcances del modelo. Los criterios y la rúbrica de evaluación previstos para esta etapa se presentan en el Anexo C.

Fase 8 - Integración de observaciones y revisión final con el tutor: Incorporación de las observaciones recibidas y revisión final del informe junto con el tutor académico, previo a la entrega formal.

Fase 9 - Elaboración del informe final: Esta fase se desarrolla de forma continua a lo largo de todo el proyecto, consolidando diagramas de red, evidencias de simulación, análisis y recomendaciones hasta su entrega para sustentación ante el jurado evaluador.

3.2. Selección y justificación de la herramienta de simulación

La formulación inicial del proyecto contempló la integración de tres herramientas de simulación: GNS3 (topología y protocolos), NS-3 (desempeño de enlaces) y SUMO (dinámica vehicular). Sin embargo, con el objetivo de garantizar la rigurosidad técnica y

la profundidad en los componentes críticos del diseño dentro de los plazos establecidos, se realizó un ajuste de alcance en la fase de validación. La complejidad técnica asociada a la interoperabilidad de tres plataformas heterogéneas, cada una con curvas de aprendizaje y formatos de intercambio de datos independientes, habría comprometido el cumplimiento de los hitos principales del cronograma. En consecuencia, se priorizó la validación funcional mediante Cisco Packet Tracer, permitiendo asegurar la coherencia lógica, la configuración de protocolos y el direccionamiento del modelo de red.

La elección de Cisco Packet Tracer se fundamenta, además, en dos consideraciones de viabilidad: primero, su accesibilidad y operatividad, al contar con una suite integrada que elimina las restricciones de licenciamiento de imágenes IOS presentes en otras herramientas; segundo, su idoneidad para verificar las dimensiones clave del diseño, segmentación por VLAN, redundancia, enrutamiento dinámico y soporte de dispositivos IoT, las cuales son replicables con alta fidelidad funcional mediante la interfaz de línea de comandos del fabricante.

Se reconoce explícitamente el alcance delimitado de esta validación: los esquemas en Packet Tracer actúan como una prueba de concepto a escala reducida, orientada a evidenciar la robustez de la lógica de diseño y no a la simulación estocástica de la red completa. Asimismo, al no incorporar la modelación detallada de la propagación radioeléctrica o la dinámica microscópica del tráfico (potencialmente cubiertas por NS-3 y SUMO), los resultados obtenidos representan una validación funcional de referencia. Por tanto, la integración multiescenario de GNS3, NS-3 y SUMO se consigna como una línea de desarrollo fundamental para etapas de post-investigación, donde los tiempos de ejecución permitan profundizar en el análisis de desempeño de alto nivel.

En consecuencia, la simulación permitió validar la arquitectura lógica, el direccionamiento IP, la segmentación mediante VLAN, la redundancia de pasarela mediante HSRP y la convergencia del protocolo OSPF. Los componentes relacionados con LTE/5G, LoRaWAN, SD-WAN, V2X, PKI e IDS/IPS forman parte del diseño

conceptual del sistema y no fueron simulados directamente, debido a las limitaciones funcionales de la herramienta seleccionada.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección

Se emplean tres técnicas principales: la revisión documental de fuentes oficiales y académicas; la observación de campo del trazado; y el análisis comparativo de los referentes internacionales. A estas técnicas se añade la simulación como técnica de validación funcional, cuyo instrumento son los esquemas de red contruidos en Cisco Packet Tracer y el registro de evidencias, capturas de configuración y de topología, que documentan su comportamiento.

3.4. Procedimiento de validez del diseño

La validez técnica del presente diseño se sustenta en una metodología de simulación orientada a la verificación de la integridad lógica y operativa de la red. Este procedimiento permite validar el comportamiento del modelo propuesto mediante la emulación de escenarios de operación tanto en condiciones de régimen estacionario como ante eventos de falla controlada.

El proceso se articula en tres dimensiones fundamentales:

- Verificación de conectividad y direccionamiento: Comprobación de la coherencia del plan de direccionamiento IP y la efectividad de la segmentación mediante VLANs.
- Evaluación de la resiliencia: Análisis del tiempo de convergencia y la respuesta de los protocolos de enrutamiento dinámico ante la caída simulada de enlaces críticos, asegurando la continuidad del servicio.
- Validación de la interfaz de servicios: Configuración de los dispositivos finales y pasarelas IoT, permitiendo verificar que la comunicación entre los nodos de borde (sensores/cámaras) y el núcleo de la red se mantiene dentro de los parámetros de diseño establecidos.

3.5. Consideraciones éticas

El estudio asume dos compromisos éticos específicos. Por una parte, toda información comercialmente sensible obtenida de las operadoras, de la ENA o de otras fuentes durante la fase de diagnóstico se maneja bajo principios de confidencialidad, análisis agregado y no divulgación de detalles operativos específicos. Por otra parte, el modelo funcional de la aplicación móvil contempla, desde su concepción, los principios de protección de datos personales que dispone la Ley 81 de 2019, lo cual incluye minimización de datos, consentimiento informado, anonimización y derecho al olvido. Todas las fuentes consultadas se citan conforme al formato APA séptima edición.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS, ANÁLISIS Y PROPUESTA

Capítulo IV. Resultados, análisis y propuesta

Este capítulo presenta el resultado central del proyecto: el diseño de la red de comunicaciones redundante y segura para la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta), junto con su validación funcional. Se exponen el diagnóstico de la red actual, el análisis comparativo internacional, la arquitectura física y lógica, el plan de direccionamiento con VLSM, la gestión del tráfico con conmutación automática, el esquema de Calidad de Servicio, la capa de seguridad, el modelo funcional de la aplicación móvil colaborativa, la simulación del diseño en Cisco Packet Tracer y el alcance de la verificación realizada.

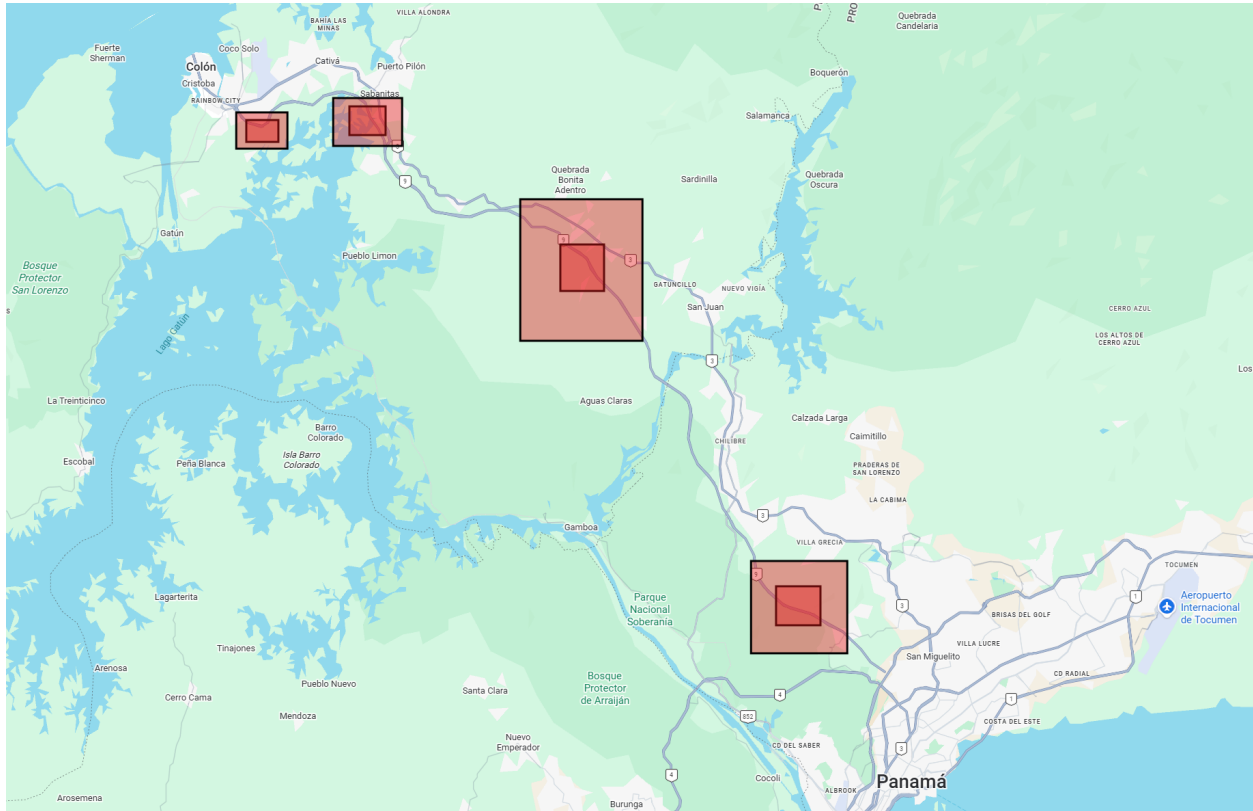
4.1. Diagnóstico de la red actual

El diagnóstico de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) de aproximadamente cincuenta y ocho (58) kilómetros evidencia tres condiciones críticas: zonas de atenuación severa o pérdida total de señal móvil, tramos sin tendido eléctrico convencional, y dependencia de enlaces y operadores únicos en varios segmentos. Tras el cese de operaciones de Claro Panamá y la consolidación del mercado, los operadores móviles activos en el país son Tigo y +Móvil, cuyas capacidades de red se consideran en la arquitectura de redundancia; para los enlaces fijos se contempla, adicionalmente, a Trans Ocean Network.

La condición de cobertura no es homogénea a lo largo del trazado. El tramo inicial, próximo a la ciudad de Panamá, conserva cobertura celular comercial razonable, reforzada por la intervención de diez (10) kilómetros ejecutada por la ASEP (2024). A medida que la vía se interna en la zona boscosa del istmo, la combinación de relieve, cortes de roca y vegetación densa produce sombras de cobertura que se agravan en condiciones de lluvia intensa, frecuentes en la vertiente atlántica. En estos mismos tramos, la ausencia de tendido eléctrico convencional impide la instalación de equipamiento activo alimentado por red comercial, condición que determina la elección de postes con autonomía solar.

Figura 1

Brechas de cobertura identificadas en la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta)



Nota. El mapa base fue adaptado de Google Maps (s.f.) Autopista Panamá–Colón. Los puntos afectados fueron añadidos por el autor.

4.2. Análisis comparativo internacional

Del análisis de los referentes se extraen tres buenas prácticas determinantes para el diseño: la estandarización e interoperabilidad promovidas por C-Roads y ETSI; la validación previa en banco de pruebas, ejemplificada por K-City; y la priorización del tráfico de seguridad vial junto con el despliegue por fases. Estas prácticas se trasladan al diseño en forma de adopción de estándares ETSI ITS y 3GPP C-V2X, validación por simulación antes de cualquier despliegue, función que en este trabajo cumple el modelo construido en Cisco Packet Tracer, y un esquema de QoS que reserva la prioridad máxima a la seguridad vial.

4.3. Arquitectura física

La arquitectura física se compone de postes inteligentes autónomos dispuestos según un modelo dual de sesenta (60) y ciento veinte (120) metros descrito en la sección 4.3.1 a lo largo de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta). Cada poste integra: paneles solares y banco de baterías de litio dimensionados para autonomía en condiciones de baja irradiación; un gabinete de grado industrial para clima tropical; radios de acceso LTE/5G; cámara de videovigilancia y luminaria eficiente; un switch de acceso que concentra los dispositivos del poste; y conexión a la troncal de fibra óptica soterrada. Entre postes se habilita un salto inalámbrico que mantiene el tráfico crítico ante la falla de un nodo o de su enlace de fibra.

En términos de capacidades, la troncal emplea fibra óptica monomodo (ITU-T G.652.D) instalada en ductos soterrados conforme a normativa, tendida en topología de doble anillo, de manera que un corte puntual del cable no aisle ningún segmento; su capacidad de diseño es de 10 Gbps por anillo, ampliable mediante multiplexación por longitud de onda, con lo cual absorbe con holgura el tráfico agregado estimado de 2.1 Gbps. El acceso celular LTE/5G, gestionado por las pasarelas de borde con capacidad SD-WAN, aporta de forma conservadora entre 50 y 100 Mbps efectivos por nodo en condiciones de cobertura comercial, capacidad suficiente para asumir el tráfico de un poste ante una falla de la fibra. Las pasarelas LoRaWAN, con una cobertura rural típica de cinco (5) a diez (10) kilómetros de radio, se distribuyen cada cinco kilómetros para garantizar el solape de celdas a lo largo de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta). La sincronización temporal de los nodos, necesaria para la integridad de la analítica V2X en tiempo real, se contempla mediante protocolos de tiempo de precisión.

4.3.1 Dimensionamiento de la infraestructura

Con el propósito de dotar al diseño de una base cuantitativa, se definió un modelo de despliegue dual sustentado en la geometría de la vía y en el nivel de riesgo de cada tramo. En las zonas de alta densidad o riesgo, curvas ciegas, accesos a urbanizaciones e intersecciones, que se estiman en aproximadamente el veinte por ciento (20%) del trazado, los postes inteligentes se disponen cada sesenta (60) metros, distancia que garantiza el solapamiento de la cobertura de las cámaras de visión

artificial (radio útil aproximado de 45 metros) y elimina los puntos ciegos, además de asegurar una cobertura de radiofrecuencia de latencia mínima para las aplicaciones V2X críticas. En los tramos rectos de tránsito fluido, con línea de vista despejada, la separación se amplía a ciento veinte (120) metros, lo que reduce la obra civil y el costo de inversión (CAPEX) sin comprometer el enlace de radiofrecuencia, dado que la visibilidad directa entre nodos preserva el presupuesto de enlace. Sobre la longitud aproximada de cincuenta y ocho (58) kilómetros de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta), este criterio arroja unos ciento noventa y tres (193) postes en zonas de riesgo y trescientos ochenta y siete (387) en tramos fluidos, para un total aproximado de quinientos ochenta (580) postes. La Tabla 3 resume el inventario estimado de los elementos principales.

Tabla 3

Estimación de elementos de la infraestructura propuesta (modelo dual 60 m / 120 m)

Elemento	Cantidad aproximada	Criterio de estimación
Postes inteligentes (zonas de riesgo)	193	Cada 60 m en ~20% del trazado (11.6 km)
Postes inteligentes (tramos fluidos)	387	Cada 120 m en ~80% del trazado (46.4 km)
Total de postes	580	Suma de ambos regímenes
Cámaras de visión artificial	322	Una por poste en zonas de riesgo; una cada tres postes en tramos fluidos
Sensores meteorológicos	116	Un conjunto cada ~500 m
Luminarias	580	Una por poste
RSU (unidades de borde)	58	Una cada 1,000 m (alcance típico V2X 300–1,000 m)
Switches de acceso	580	Uno por poste
Enrutadores (Core, TMC y agregación)	8	2 en Core (HSRP), 2 en TMC, 1 por zona (Z1–Z3) y 1 de respaldo
Gateways LoRaWAN	12	Uno cada ~5 km (cobertura rural típica 5–10 km)

Nota. CAPEX = Capital Expenditure (costo de inversión); RSU = Roadside Unit (Unidad de borde de carretera); TMC = Traffic Management Center (Centro de Gestión de Tránsito); HSRP = Hot Standby

Router Protocol. Las cantidades constituyen estimaciones de diseño derivadas del modelo dual de separación (60 m en zonas de riesgo, 120 m en tramos de tránsito fluido) sobre los 58 km de la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta).

Sobre la base de este inventario se estimó el tráfico agregado de la red mediante el método estándar de planificación de capacidad: caudal por dispositivo multiplicado por la cantidad de dispositivos, más un margen de crecimiento. Cada cámara de visión artificial genera un flujo aproximado de 4 Mbps (video 1080p con códec H.265); cada RSU aporta un caudal V2X estimado de 1.5 Mbps en hora pico; el tráfico de gestión y monitoreo se estima en 0.2 Mbps por poste; y la telemetría de sensores agrega un caudal marginal. Ello arroja un tráfico agregado cercano a 1.5 Gbps hacia el núcleo. Aplicando una reserva de crecimiento del cuarenta por ciento (40%) a cinco años, la troncal debe dimensionarse para al menos 2.1 Gbps sostenidos, requisito que la fibra óptica propuesta de 10 Gbps por anillo satisface con holgura. La Tabla 4 sintetiza esta estimación.

Tabla 4

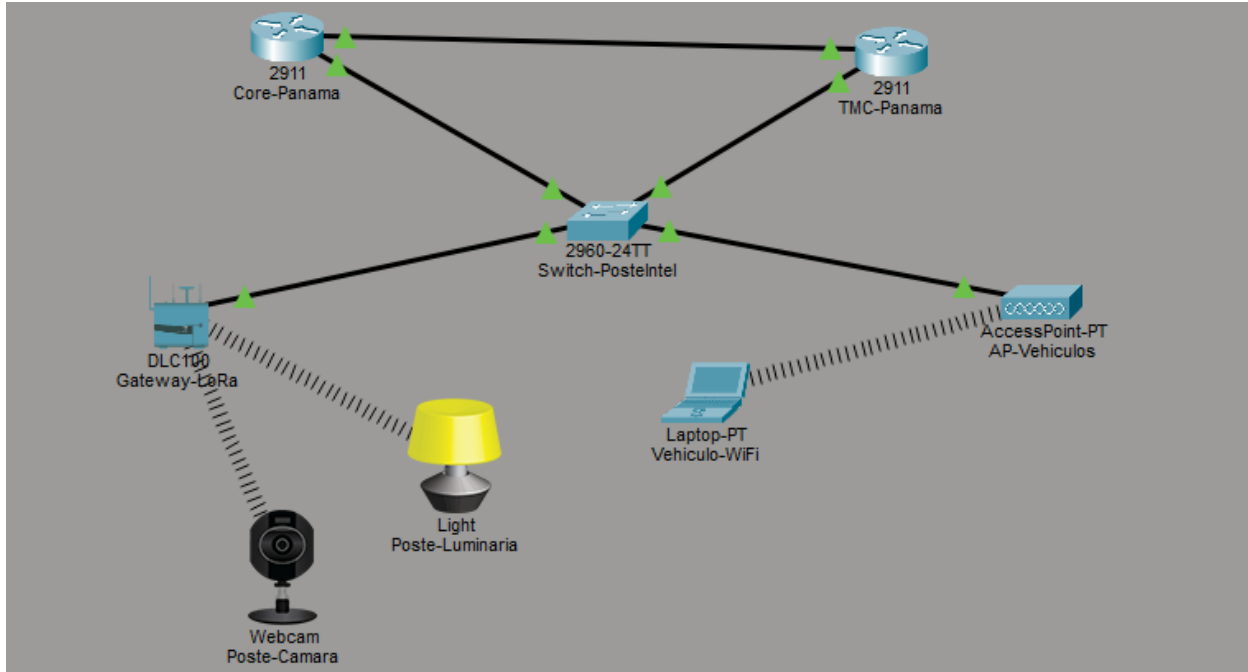
Estimación del tráfico agregado de la red

Tipo de tráfico	Caudal unitario	Cantidad	Agregado
Videovigilancia (H.265, 1080p)	4.0 Mbps/cámara	322 cámaras	1,288 Mbps
V2X / RSU (hora pico)	1.5 Mbps/RSU	58 RSU	87 Mbps
Gestión y monitoreo	0.2 Mbps/poste	580 postes	116 Mbps
Telemetría de sensores	0.1 Mbps/conjunto	116 conjuntos	12 Mbps
Total estimado			≈ 1.5 Gbps
Con reserva de crecimiento (40%)			≈ 2.1 Gbps

Nota. H.265 = códec de compresión de video de alta eficiencia; V2X = Vehicle-to-Everything; RSU = Roadside Unit. Los caudales unitarios corresponden a valores típicos de la industria; el agregado se calcula multiplicando el caudal unitario por la cantidad de dispositivos, con una reserva de crecimiento del 40% a cinco años.

Figura 2

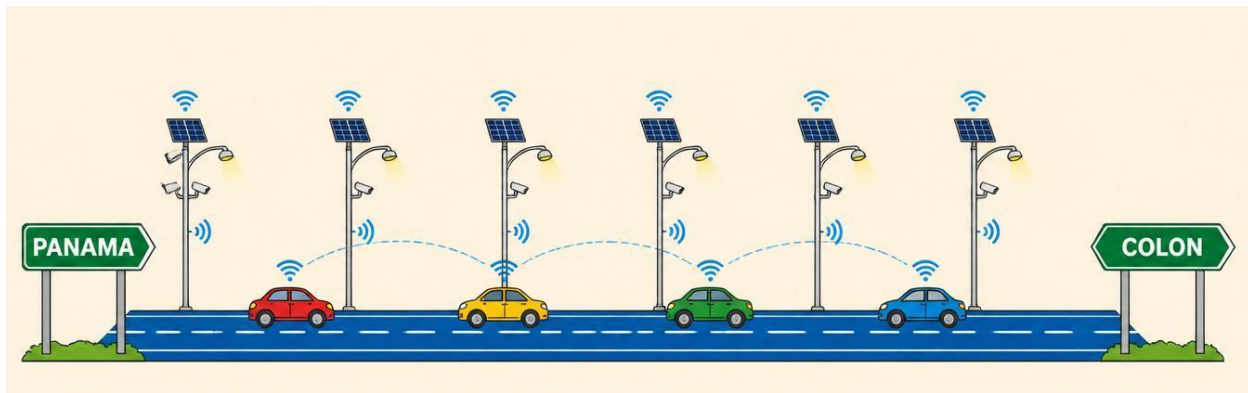
Arquitectura general de tres niveles de la red propuesta



Nota. Representación conceptual de la arquitectura de tres niveles propuesta para la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta).

Figura 3

Postes IoT junto a vehículos no V2X y con V2X.



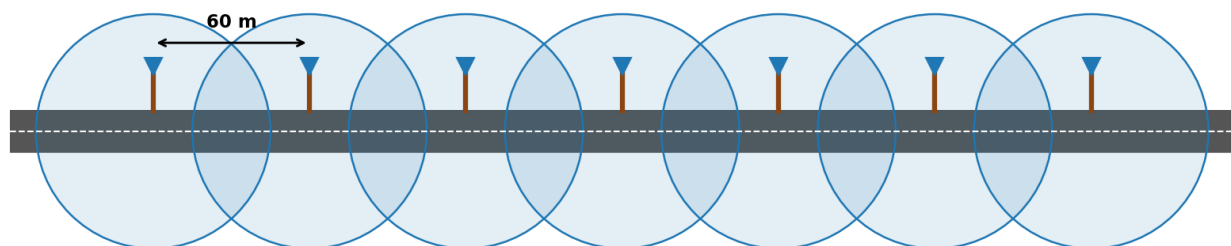
Nota. Representación gráfica de los postes IoT desplegados a lo largo de la Autopista Panamá-Colón.

4.3.2 Validación conceptual de cobertura RF

Figura 4

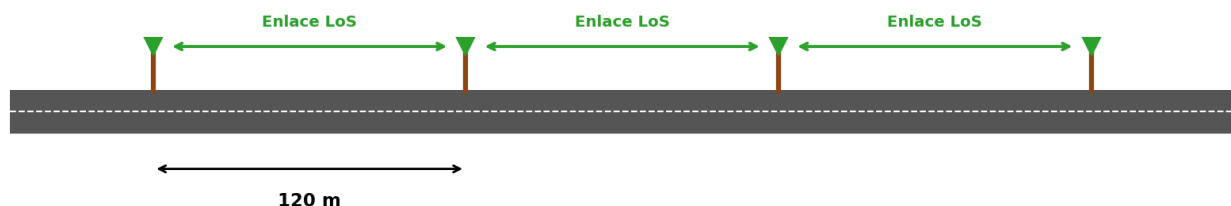
Modelo dual de separación de postes: cobertura solapada (60 m) y enlace de línea de vista (120 m)

Zona de alta densidad / riesgo — Postes cada 60 m: cobertura solapada, sin puntos ciegos



Radio de cobertura de cámara/sensor ≈ 45 m $\rightarrow$ solape entre postes adyacentes garantizado

Zona de tránsito fluido — Postes cada 120 m: enlace de línea de vista (LoS) directo



La visibilidad directa mantiene el presupuesto de enlace RF y la relación señal-ruido (SINR) requerida

Nota. LoS = Line of Sight (línea de vista); SINR = Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (relación señal-ruido e interferencia). El panel superior ilustra el solapamiento de las celdas de cobertura de las cámaras (radio útil ≈ 45 m) con separación de 60 m en zonas de riesgo; el panel inferior ilustra el enlace directo de línea de vista con separación de 120 m en tramos de tránsito fluido.

La pertinencia de las separaciones adoptadas se verifica de manera conceptual mediante diagramas de cobertura y de línea de vista (en inglés, Line of Sight o LoS). En las zonas de riesgo, la separación de 60 metros con un radio de cobertura útil de cámara de aproximadamente 45 metros produce el solapamiento de las celdas de observación entre postes adyacentes, eliminando los puntos ciegos. En los tramos fluidos, la separación de 120 metros preserva la visibilidad directa entre nodos, condición suficiente para mantener el presupuesto de enlace de radiofrecuencia y la relación señal-ruido (SINR) exigida por los estándares europeos de seguridad vial (ETSI C-ITS). La Figura 4 ilustra ambos regímenes. Se reconoce que esta verificación es de carácter conceptual: la confirmación cuantitativa mediante modelado tridimensional del entorno (gemelo digital) y la generación de mapas de calor de cobertura se consignan como línea de trabajo futuro, en coherencia con el alcance de simulación definido en la sección 3.2.

4.4. Arquitectura lógica y segmentación por VLAN

El enrutamiento dinámico se organiza en un área OSPF única, el área 0 o backbone. Esta decisión se justifica en el tamaño del dominio de enrutamiento: los postes inteligentes operan en capa 2 (conmutación y VLAN) y no participan del protocolo, de modo que solamente los enrutadores de núcleo, del TMC y de agregación zonal —menos de una decena de equipos— intercambian estados de enlace. Con esa escala, la segmentación en múltiples áreas introduciría complejidad de configuración y de diagnóstico sin aportar beneficios de convergencia ni de reducción de la base de datos de estados de enlace, cuyos umbrales prácticos se sitúan en decenas de enrutadores por área. La métrica de costo OSPF se calcula con un ancho de banda de referencia ajustado a 10 Gbps, de manera que los enlaces de fibra resulten siempre preferidos frente a los respaldos celulares. El plan de direccionamiento jerárquico facilita, además, la sumarización de las redes de cada zona (10.1.0.0/16 para los dominios vehiculares y 10.2.0.0/16 para la infraestructura), lo que simplificaría una eventual migración a un esquema multiárea si la red se extendiera a otros corredores.

Tabla 5

Segmentación lógica por VLAN y prioridad de tráfico

VLAN	Dominio	Tipo de tráfico	Prioridad QoS
VLAN 10	Vehicular (V2X)	Alertas V2X, incidentes, telemetría crítica	Máxima
VLAN 20	Sensores IoT	Telemetría meteorológica y de infraestructura	Alta
VLAN 30	Videovigilancia	Flujos de cámaras de seguridad	Alta
VLAN 40	Gestión	Administración de nodos, monitoreo	Alta
VLAN 50	Usuario / aplicación	Aplicación colaborativa, información	Media
VLAN 60	Entretenimiento	Tráfico no crítico	Baja

Nota. QoS: Calidad de Servicio (Quality of Service); V2X: Vehicle-to-Everything (comunicación vehículo a todo); IoT: Internet de las Cosas. La priorización de tráfico se diseñó para garantizar la disponibilidad del servicio crítico de seguridad vial.

4.5. Plan de direccionamiento IP con VLSM

Se seleccionó la red privada 10.0.0.0/8 (RFC 1918) por ser el bloque de mayor tamaño disponible para direccionamiento interno, lo que permite codificar la jerarquía geográfica de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) en el segundo octeto (10.1.0.0 para dominios vehiculares, 10.2.0.0 para infraestructura, 10.3.0.0 para el TMC) y absorber el crecimiento futuro de zonas y dispositivos sin reenumeración; los bloques 172.16.0.0/12 y 192.168.0.0/16 resultarían insuficientes para sostener esta jerarquía a escala de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) completa.

Tabla 6

Plan de direccionamiento IP con VLSM sobre la red 10.0.0.0/8

Segmento	Subred	Máscara	Hosts útiles	Propósito
Vehículos RSU-Z1	10.1.0.0	/21	2,046	Dominio vehicular dinámico de la zona 1
Vehículos RSU-Z2	10.1.16.0	/21	2,046	Dominio vehicular dinámico de la zona 2
Vehículos RSU-Z3	10.1.32.0	/21	2,046	Dominio vehicular dinámico de la zona 3
Infraestructura Z1	10.2.1.0	/24	254	Cámaras, sensores y luminarias de la zona 1
Infraestructura Z2	10.2.2.0	/24	254	Cámaras, sensores y luminarias de la

Segmento	Subred	Máscara	Hosts útiles	Propósito
				zona 2
Infraestructura Z3	10.2.3.0	/24	254	Cámaras, sensores y luminarias de la zona 3
TMC	10.3.0.0	/24	254	Centro de Gestión de Tránsito
Enlaces punto a punto	10.255.255.0	/30 (×N)	2 por enlace	Interconexión entre enrutadores

Nota. VLSM: Variable Length Subnet Mask (Máscara de subred de longitud variable); RSU: Roadside Unit (Unidad de borde de carretera); TMC: Traffic Management Center (Centro de Gestión de Tránsito). La red base utilizada para el direccionamiento es 10.0.0.0/8.

4.6. Asignación de interfaces del nodo de núcleo

Tabla 7

Asignación de interfaces del router Core

Interfaz	Destino	Función
GigabitEthernet0/0/0	TMC	Enlace al Centro de Gestión de Tránsito
GigabitEthernet0/0/1	RSU-Z2	Agregación de la zona RSU 2
GigabitEthernet0/1/0	RSU-Z3	Agregación de la zona RSU 3
GigabitEthernet0/1/1	RSU-Z1	Agregación de la zona RSU 1
GigabitEthernet0/1/2	LTE-Backup	Respaldo celular del núcleo

Nota. TMC = Traffic Management Center (Centro de Gestión de Tráfico); RSU = Roadside Unit (Unidad a Pie de Carretera); LTE-Backup = LTE -Redundancy (Respaldo mediante red celular)

4.7. Gestión del tráfico y conmutación automática

El mecanismo de conmutación automática (failover) opera en cascada. Ante la falla del enlace de fibra de un nodo, SD-WAN deriva el tráfico al acceso celular LTE/5G, que conserva la capacidad de transportar la totalidad de los servicios. Si el acceso celular también falla o se degrada, LoRaWAN respalda exclusivamente la transmisión de eventos críticos, telemetría y alarmas de seguridad vial, dado que su baja tasa de transferencia y el tamaño reducido de sus paquetes no permiten sostener tráfico IP general ni flujos de video. En ese escenario degradado, el salto inalámbrico entre postes complementa la entrega de los mensajes prioritarios hacia el nodo vecino. La convergencia del enrutamiento se gestiona con OSPF y la redundancia de pasarela con HSRP, de modo que la caída de un equipo no interrumpe el servicio.

4.7.1 Estimación de disponibilidad y tiempos de convergencia

La disponibilidad del diseño se estimó a partir de la métrica estándar $\text{Disponibilidad} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$, donde MTBF es el tiempo medio entre fallas y MTTR el tiempo medio de reparación. Tomando como referencia un MTBF típico de 200,000 horas para enrutadores de la clase ISR (según las hojas de datos del fabricante) y un MTTR de 4 horas con repuestos en sitio, un nodo individual alcanza una disponibilidad de 99.998%. Al operar los equipos de núcleo en pares redundantes mediante HSRP, la indisponibilidad simultánea de ambos equipos resulta del producto de sus indisponibilidades individuales, con lo cual la disponibilidad de la función de pasarela se eleva por encima de 99.9999%. Considerando adicionalmente los enlaces y las fuentes de energía, el diseño se plantea como objetivo de servicio (SLA) una disponibilidad global de 99.99%, equivalente a un máximo de 52.6 minutos de interrupción por año. La Tabla 8 resume los tiempos de convergencia esperados de los mecanismos de redundancia configurados.

Debe precisarse, no obstante, que estas cifras representan el escenario ideal del modelo teórico, que contempla únicamente la falla de los equipos en condiciones controladas. En la operación real, la disponibilidad resulta afectada por factores que el cálculo no captura: los cortes de fibra ocasionados por obras civiles a lo largo de la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta), la extensión del tiempo de reparación (MTTR) en los tramos boscosos de difícil acceso, donde las condiciones climáticas de

la vertiente atlántica pueden demorar la atención en sitio muy por encima de las cuatro horas asumidas, la disponibilidad de las redes celulares comerciales, que depende de los acuerdos de servicio de los operadores y escapa al control del diseño, la autonomía finita de los sistemas de energía solar ante períodos prolongados de baja irradiación, y el error humano en las labores de operación y mantenimiento. Por estas razones, se estima que la disponibilidad efectiva durante las primeras etapas de operación se situaría en el rango de 99.9% a 99.95% (entre 8.8 y 4.4 horas de interrupción acumulada por año), valores consistentes con los acuerdos de nivel de servicio típicos de los enlaces terrestres comerciales. El objetivo de 99.99% se plantea, en consecuencia, como una meta de madurez operativa, alcanzable de manera progresiva mediante el ajuste de los procedimientos de mantenimiento preventivo, la disposición de repuestos estratégicos en ambos extremos de la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta) y la depuración de las políticas de conmutación automática a partir de la experiencia operativa acumulada.

Tabla 8

Parámetros de disponibilidad y convergencia estimados

Parámetro	Valor estimado	Fundamento
Convergencia HSRP (temporizadores por defecto)	≈ 10 s	Hello 3 s / Hold 10 s
Convergencia HSRP (temporizadores ajustados)	< 3 s	Hello 1 s / Hold 3 s
Reconvergencia OSPF (ajustada)	1 – 5 s	Temporizadores hello/dead reducidos
Conmutación SD-WAN fibra → LTE/5G	< 1 s	Detección por sondas BFD del overlay
MTBF por enrutador	200,000 h	Hoja de datos del fabricante (clase ISR)
MTTR	4 h	Repuestos y personal en sitio
Disponibilidad de un nodo	99.998 %	MTBF / (MTBF + MTTR)
Disponibilidad pasarela redundante (HSRP)	> 99.9999 %	Indisponibilidades en paralelo

Parámetro	Valor estimado	Fundamento
SLA objetivo de la red	99.99 %	≤ 52.6 min de interrupción/año

Nota. MTBF = Mean Time Between Failures (tiempo medio entre fallas); MTTR = Mean Time To Repair (tiempo medio de reparación); SLA = Service Level Agreement (acuerdo de nivel de servicio); BFD = Bidirectional Forwarding Detection. La disponibilidad se calcula como $MTBF / (MTBF + MTTR)$; la disponibilidad de la pasarela redundante resulta del producto de las indisponibilidades individuales de los equipos en paralelo. Elaboración con base en hojas de datos del fabricante.

4.8. Esquema de Calidad de Servicio

Tabla 9

Esquema de Calidad de Servicio por clase de tráfico

Clase de tráfico	Marcado DSCP	Tratamiento	Objetivo de latencia
Seguridad vial (V2X)	EF (46)	Cola prioritaria, sin descarte	Baja (≤ 100 ms extremo a extremo)
Gestión y sensórica	AF41	Cola garantizada	Media-baja
Aplicación / usuario	AF21	Ancho de banda asegurado	Media
Entretenimiento	BE (0)	Mejor esfuerzo	Sin garantía

Nota. DSCP = Differentiated Services Code Point (Punto de código de servicios diferenciados); EF = Expedited Forwarding (Reenvío acelerado); AF = Assured Forwarding (Reenvío asegurado); BE = Best Effort (Mejor esfuerzo); V2X = Vehicle-to-Everything; QoS = Calidad de Servicio. La política de priorización descrita se fundamenta en el estándar IEEE 802.1p para garantizar la integridad de los paquetes críticos de seguridad vial frente a tráfico de menor prioridad en la arquitectura de red propuesta.

4.9. Capa de seguridad

La capa de seguridad se diseña bajo el enfoque de Confianza Cero. Comprende el cifrado de extremo a extremo de las comunicaciones, la autenticación de nodos y dispositivos mediante PKI, la segmentación por VLAN para aislar los dominios críticos,

y la inspección del tráfico con IDS/IPS para detectar y contener ataques de denegación de servicio y de suplantación. El marco se alinea con ISO/IEC 27001 e ISO/SAE 21434, y la gestión de datos de la aplicación se rige por la Ley 81 de 2019.

En cuanto a su implementación, los controles se distribuyen en tres puntos de la arquitectura. En el núcleo, un par de firewalls de nueva generación en configuración de alta disponibilidad (activo/pasivo), ubicados entre el enrutador Core y el Centro de Gestión de Tránsito (TMC), concentra la inspección de estado, el filtrado entre VLAN y la terminación de las conexiones provenientes de la aplicación móvil. El sensor IDS/IPS opera en línea en este mismo punto de agregación, dado que la totalidad del tráfico de campo converge hacia el núcleo; esta ubicación centralizada evita el costo y la complejidad de desplegar sensores en cada uno de los aproximadamente 580 postes, cuyos flujos individuales se supervisan de forma complementaria mediante exportación de NetFlow desde los enrutadores de agregación.

En el plano de transporte, la confidencialidad se garantiza mediante los túneles IPsec del overlay SD-WAN entre los enrutadores de borde (cEdge) de cada zona y el núcleo, mientras que las comunicaciones de la aplicación móvil y de la página web con los servidores del TMC se protegen con TLS 1.3. En el borde de acceso, cada puerto del switch del poste inteligente aplica autenticación 802.1X basada en los certificados digitales emitidos por la PKI del proyecto, de modo que las cámaras, los sensores y las pasarelas IoT deben autenticarse antes de obtener acceso a su VLAN; los puertos no utilizados permanecen administrativamente deshabilitados. Este esquema materializa el principio de Confianza Cero: ningún dispositivo se considera confiable por su ubicación física, y todo acceso se verifica de manera explícita.

4.10. Modelo funcional de la aplicación móvil colaborativa

La aplicación móvil colaborativa actúa como puente inclusivo entre la infraestructura y los conductores de vehículos antiguos sin V2X nativo. Recibe y entrega, en tiempo real, información de incidentes, congestión, alertas meteorológicas y eventos reportados por otros conductores, integrando datos de las cámaras y los sensores instalados sobre los postes. Su diseño incorpora, desde el origen, los

principios de protección de datos personales: minimización, consentimiento informado, anonimización y derecho al olvido.

Debe precisarse que la aplicación móvil no reemplaza a las comunicaciones V2X nativas: sus tiempos de entrega, dependientes de la red celular y del sistema operativo del teléfono, no satisfacen los requisitos de latencia de las aplicaciones críticas de seguridad definidos por el 3GPP. Su función es complementaria: extiende los servicios informativos y las alertas no críticas a los conductores de vehículos que carecen de equipamiento V2X de fábrica.

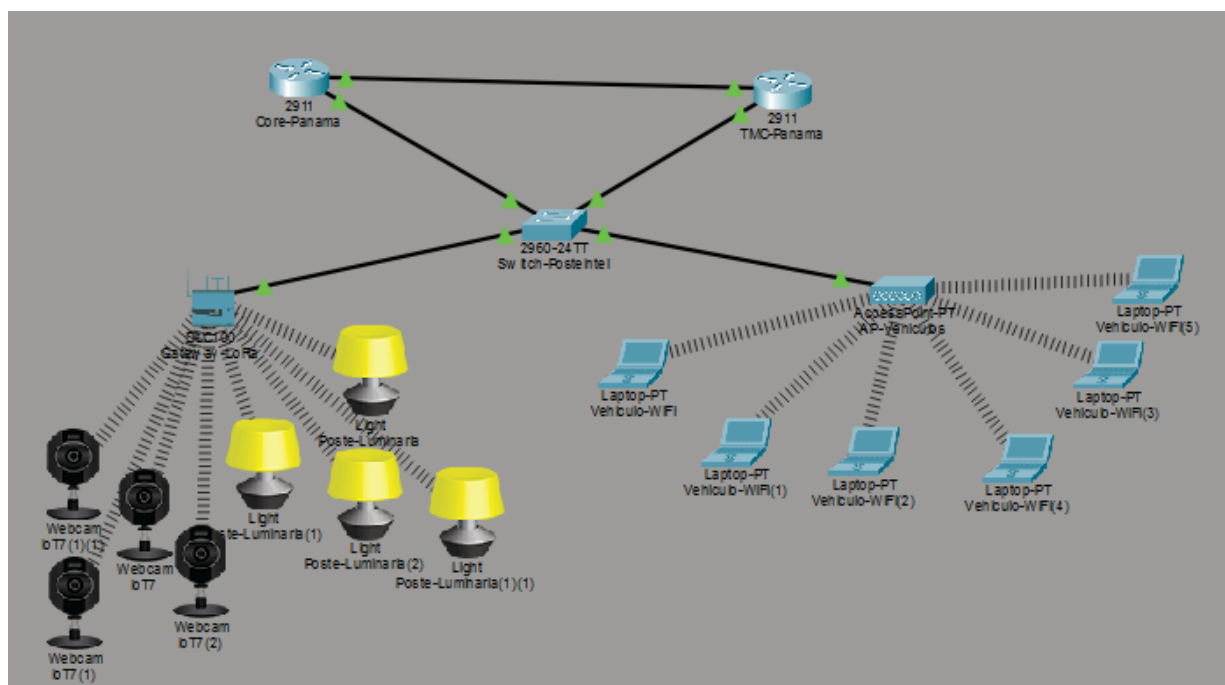
4.11. Simulación del diseño en Cisco Packet Tracer

La validación funcional del diseño se efectuó sobre esquemas básicos contruidos en Cisco Packet Tracer. Por las restricciones de tiempo señaladas en la sección 3.2, estos esquemas no reproducen la red completa de la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta), sino que modelan, a escala reducida y a título de referencia, la unidad estructural de la red: un poste inteligente con sus dispositivos de campo, su switch de acceso, y el par de enrutadores redundantes que enlazan el segmento con el núcleo y el Centro de Gestión de Tránsito. El modelo emplea un direccionamiento de laboratorio (redes 192.168.10.0/24, 192.168.20.0/24 y 192.168.30.0/24, y el enlace punto a punto 10.0.0.0/30) que materializa, en escala reducida, la lógica del plan VLSM de despliegue descrito en la sección 4.5. Las figuras que siguen documentan, mediante capturas de la topología y de las configuraciones (códigos) aplicadas, el comportamiento esperado de los componentes nucleares del diseño.

4.11.1. Topología del modelo

Figura 5

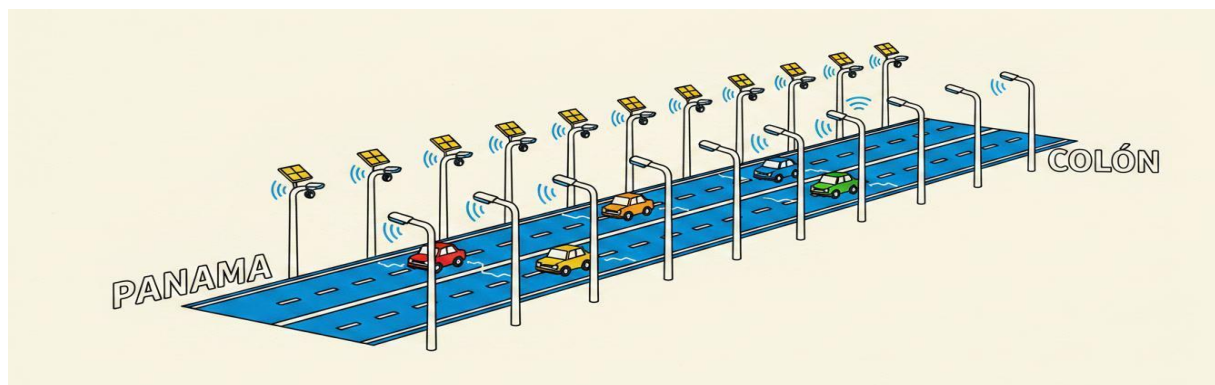
Topología de la red simulada en Cisco Packet Tracer



Nota. El esquema ilustra la integración de dispositivos IoT, incluyendo cámaras y luminarias, los cuales operan como sensores de infraestructura, junto con cinco (5) terminales (laptops) que simulan el comportamiento de vehículos, tanto con capacidades V2X como sin ellas, dentro del entorno de red validado.

Figura 6

Vista simplificada de la red en toda la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta)



Nota. Representación técnica de la infraestructura de borde (Smart Pole) que integra dispositivos IoT (cámaras de videovigilancia, sensores ambientales y sistema fotovoltaico) en comunicación bidireccional con vehículos equipados con tecnología V2X. Este nodo constituye la unidad básica de despliegue para la recolección de datos, monitoreo de seguridad y gestión del tráfico en tiempo real a lo largo de la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta).

4.11.2. Configuración de la segmentación por VLAN

Figura 7

Configuración de VLAN en el switch del poste inteligente

```
Switch>
Switch>
Switch>enable
Switch#configure terminal
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
Switch(config)#vlan 10
Switch(config-vlan)# name Vehiculos_V2X
Switch(config-vlan)#vlan 20
Switch(config-vlan)# name Sensores_IoT
Switch(config-vlan)#vlan 30
Switch(config-vlan)# name Seg_Camaras
Switch(config-vlan)#exit
Switch(config)#interface range fastEthernet 0/1 - 5
Switch(config-if-range)# switchport mode access
Switch(config-if-range)# switchport access vlan 10
Switch(config-if-range)# spanning-tree portfast
%Warning: portfast should only be enabled on ports connected to a single
host. Connecting hubs, concentrators, switches, bridges, etc... to this
interface when portfast is enabled, can cause temporary bridging loops.
Use with CAUTION
```

Nota. Configuración lógica de las VLAN en el switch mediante la Interfaz de Línea de Comandos (CLI) de Cisco Packet Tracer. Se evidencia la creación y segmentación de la VLAN 10 (Vehiculos_V2X), VLAN 20 (Sensores_IoT) y VLAN 30 (Seg_Camaras), implementando las políticas de aislamiento de tráfico necesarias para la arquitectura de la red propuesta.

CONCLUSIONES

Conclusiones

A partir del desarrollo del diseño y de la validación funcional expuesta en los capítulos precedentes, se derivan las siguientes conclusiones:

- Viabilidad técnica del diseño multitecnología: Se comprobó que el diseño de una red de comunicaciones para la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) basada en la integración de fibra óptica soterrada, LTE/5G y LoRaWAN es técnicamente factible. Esta arquitectura resuelve las brechas de cobertura críticas identificadas, mitigando los problemas de atenuación provocados por la topografía y la vegetación.
- Sostenibilidad operativa mediante postes autónomos: La adopción de postes inteligentes con alimentación solar y bancos de baterías de litio resulta ser la estrategia óptima para superar la carencia de tendido eléctrico comercial en los tramos selváticos, garantizando la operatividad ininterrumpida de los nodos.
- Resiliencia y alta disponibilidad: El diseño incorpora HSRP para la redundancia de pasarela y OSPF para el enrutamiento dinámico, junto con un salto inalámbrico entre postes que previene la interrupción del servicio en la troncal. La configuración lógica de estos mecanismos quedó especificada en el modelo, y su verificación empírica detallada mediante escenarios de falla inducida se plantea como línea de trabajo inmediata a partir del modelo construido en Cisco Packet Tracer.
- Seguridad transversal y Confianza Cero: La estructura lógica segmentada mediante VLAN, sumada al cifrado y los mecanismos IDS/IPS bajo las normativas ISO/IEC 27001 e ISO/SAE 21434, aísla exitosamente el tráfico crítico de seguridad vial (V2X) frente a vulnerabilidades del tráfico de entretenimiento y aplicaciones de usuario, confirmando un entorno de Confianza Cero.
- Inclusión tecnológica: El modelo funcional de la aplicación móvil colaborativa elimina la barrera tecnológica para el parque vehicular antiguo de Panamá, democratizando el acceso a las alertas tempranas y la seguridad vial, en apego a los preceptos de privacidad de la Ley 81 de 2019.

- Eficacia de la validación por simulación: Cisco Packet Tracer resultó eficaz para comprobar la coherencia lógica del diseño, la segmentación por VLAN, la redundancia de pasarela mediante HSRP, la convergencia de OSPF y el plan de direccionamiento jerárquico (VLSM). Los componentes de LTE/5G, LoRaWAN, SD-WAN, V2X, PKI e IDS/IPS se mantienen como diseño conceptual, pendientes de validación mediante herramientas especializadas (NS-3, SUMO) o mediante pruebas de campo en una fase posterior.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones

Recomendaciones para la organización / sector estudiado

- Despliegue gradual por fases: Se sugiere a las autoridades competentes y a la empresa administradora iniciar un programa piloto de implementación enfocado exclusivamente en los tramos de mayor siniestralidad y nula cobertura, para posteriormente escalar el modelo al resto de la vía de alta velocidad.
- Alianzas interinstitucionales para el espectro: Promover mesas de trabajo conjuntas entre la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP), los operadores de telecomunicaciones locales y la academia para definir y asegurar las bandas de frecuencia reservadas al entorno V2X en Panamá.
- Mantenimiento de estándares de ciberseguridad: Mantener actualizada la capa de seguridad de la infraestructura conforme a las revisiones periódicas de las normas ISO/IEC 27001 e ISO/SAE 21434, asegurando auditorías regulares en el Centro de Gestión de Tránsito (TMC).

Recomendaciones para futuras investigaciones

- Ejecución de validación por juicio de expertos: Dado el carácter de Proyecto Factible y las restricciones de tiempo inherentes al calendario académico de la presente investigación, se recomienda como siguiente paso someter la arquitectura detallada a la evaluación de un panel de especialistas (telecomunicaciones y ciberseguridad) utilizando el instrumento de rúbrica diseñado en los anexos de este documento.
- Profundización de las simulaciones radioeléctricas: Tomar esta arquitectura lógica y física como base para escalarla utilizando plataformas especializadas como NS-3 y SUMO. Esto permitirá obtener métricas cuantitativas precisas sobre el retardo (latencia) en comunicaciones vehiculares a 120 km/h y evaluar el impacto físico de las sombras de cobertura electromagnética.
- Desarrollo de prototipo de la aplicación móvil: Diseñar y programar una versión alfa de la aplicación colaborativa y la página web propuesta, incorporando pruebas de usabilidad (UX/UI) con conductores frecuentes de la Autopista

Panamá-Colón (Don Alberto Motta) para optimizar la interfaz de alertas tempranas.

Alianzas interinstitucionales

Promover mesas de trabajo conjuntas entre la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP), los operadores locales y la academia para definir las bandas de frecuencia reservadas al entorno V2X en Panamá.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencias bibliográficas

3GPP. (2020). Service requirements for enhanced V2X scenarios (TS 22.186, versión 16.2.0). 3rd Generation Partnership Project. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.186/

Autoridad de Tránsito y Transporte Terrestre. (2024). *Estadísticas de accidentes de tránsito y víctimas fatales por provincia y comarca indígena (Periodo 2022-2023)*. Autoridad Nacional de Transparencia y Acceso a la Información (ANTAI), Portal de Monitoreo de Datos Abiertos. <https://monitoreo.antai.gob.pa/api/submissions/180988/files/48484/download>

Araniti, G., Campolo, C., Condoluci, M., Iera, A., y Molinaro, A. (2013). LTE for vehicular networking: A survey. *IEEE Communications Magazine*, 51(5), 148–157. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2013.6515060>

Asamblea Nacional de Panamá. (2019). Ley 81 de 26 de marzo de 2019 sobre Protección de Datos Personales. *Gaceta Oficial Digital* N.º 28743-A. <https://www.gacetaoficial.gob.pa/>

Autoridad Nacional de los Servicios Públicos. (2024). Proyecto de mejora de cobertura de telefonía celular en la Autopista Don Alberto Motta. ASEP. <https://asep.gob.pa/>

Chen, S., Hu, J., Shi, Y., Peng, Y., Fang, J., Zhao, R., y Zhao, L. (2017). Vehicle-to-everything (V2X) services supported by LTE-based systems and 5G. *IEEE Network*, 31(3), 26–32. <https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1600300>

Cisco Networking Academy. (2023). Cisco Packet Tracer: Network simulation and visualization tool. Cisco Systems. <https://www.netacad.com/courses/packet-tracer>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021). *Sistemas inteligentes de transporte en América Latina y el Caribe: estado del arte y oportunidades*. Naciones Unidas. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/>

C-Roads Platform. (2020). C-Roads: The platform of harmonised C-ITS deployment in Europe. Publications Office of the European Union. <https://www.c-roads.eu/>

ETSI. (2019). Intelligent transport systems (ITS); Communications architecture (ETSI EN 302 665 V1.1.1). European Telecommunications Standards Institute. <https://www.etsi.org/>

Festag, A. (2014). Cooperative intelligent transport systems standards in Europe. IEEE Communications Magazine, 52(12), 166–172. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6979970>

Google. (2026). Gemini [herramienta de inteligencia artificial generativa]. <https://gemini.google.com/>

Google. (s. f.). Autopista Panamá–Colón [mapa]. Google Maps. Recuperado el 18 de junio de 2026, de <https://maps.google.com/>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.^a ed.). McGraw-Hill.

Hurtado de Barrera, J. (2010). Metodología de la investigación: guía para una comprensión holística de la ciencia. Quirón-Sypal.

International Organization for Standardization e International Electrotechnical Commission. (2022). Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements (ISO/IEC 27001:2022). ISO. <https://www.iso.org/standard/27001>

International Organization for Standardization y SAE International. (2021). Road vehicles — Cybersecurity engineering (ISO/SAE 21434:2021). ISO. <https://www.iso.org/standard/70918.html>

Kurose, J. F., y Ross, K. W. (2021). Computer networking: A top-down approach (8.^a ed.). Pearson.

La Estrella de Panamá. (2023, 13 de noviembre). Inscripción de autos en 2023, la mayor de los últimos cinco años. <https://www.laestrella.com.pa/>

LoRa Alliance. (2020). LoRaWAN L2 1.0.4 specification (TS001-1.0.4). <https://lora-alliance.org/>

Ministerio de Obras Públicas de Panamá. (2015). Especificaciones técnicas de la Autopista Don Alberto Motta. MOP. <https://www.mop.gob.pa/>

Moy, J. (1998). OSPF version 2 (RFC 2328). Internet Engineering Task Force. <https://doi.org/10.17487/RFC2328>

Naik, G., Choudhury, B., y Park, J. M. (2019). IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications. IEEE Access, 7, 70169–70184. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919489>

Panamá América. (2024, 14 de diciembre). En Panamá se registran 141 accidentes de tránsito por día. <https://www.panamaamerica.com.pa/>

Odom, W. (2020). CCNA 200-301 official cert guide, volume 1. Cisco Press.

Stallings, W. (2016). Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and cloud. Addison-Wesley.

Tanenbaum, A. S., Feamster, N., y Wetherall, D. J. (2021). Computer networks (6.^a ed.). Pearson.

ANEXOS

Anexos

Anexo A. Registro de Prompts

A continuación, se catalogan las evidencias del registro de comandos (prompts) empleados durante el proceso.

A.1. Prompt N.º 1: Estructuración Inicial y Enfoque Metodológico

Propósito: Asistencia metodológica para la organización formal del marco del anteproyecto.

Texto: Asume el rol de estudiante avanzado del programa de maestría en Redes de Comunicaciones con énfasis en Seguridad, para que me ayudes a elaborar un anteproyecto correspondiente a mi Proyecto de Graduación, el cual consiste en el desarrollo de una actividad profesional debidamente planificada y supervisada que será realizada por el estudiante en una institución, empresa o comunidad en donde deberá demostrar los conocimientos adquiridos en su formación profesional. Entre las áreas y/o asignaturas que más me interesaron cuando las cursé fueron Seguridad en Redes e Infraestructura Crítica. Actualmente me desempeño como Administrador de Web/IT en la institución/organización/empresa; ahí he notado la siguiente problemática en la cual me gustaría trabajar mi proyecto de graduación: Falta de una infraestructura de red segura y conectividad en la Autopista Panamá–Colón (Don Alberto Motta) logístico. Considera que el anteproyecto que requiero elaborares debe cumplir con las siguientes partes y pautas: (1) Título original e inédito del proyecto no mayor a 15 palabras; (2) Justificación del proyecto...

A.2. Prompt N.º 2: Solicitud de Generación y Apoyo Gráfico

Propósito: Generación de imágenes.

Texto: Pudieras crearme una imagen de una Autopista Panamá–Colón inteligente con carros V2X, sensores en los postes.

Anexo B. Datos de accidentes de tránsito

Tabla 10

Distribución total de accidentes de tránsito y víctimas fatales en la República de Panamá por regiones (Acumulado enero-noviembre 2023)

Provincia / Región	Accidentes	Muertos
Panamá	23,317	65
Colón	2,238	25
Panamá Oeste	6,166	55
Chiriquí	3,613	77
Veraguas	1,668	26
Coclé	1,404	34
Otras Prov./Comarcas*	2,168	41
Total Nacional	40,574	323

Nota. Otras Prov./Comarcas incluye los registros individuales de Bocas del Toro, Darién, Herrera, Los Santos, Kuna Yala y Ngäbe Buglé. Los datos corresponden al registro histórico consolidado de la

Autoridad de Tránsito y Transporte Terrestre (ATTT), recuperado a través de la plataforma de datos abiertos de la Autoridad Nacional de Transparencia y Acceso a la Información (ANTAI, 2024).

Anexo C. Instrumento de validación por juicio de expertos

El presente instrumento constituye la rúbrica de valoración prevista para la validación del diseño mediante juicio de expertos, contemplada como fase de seguimiento en la sección 3.1 del marco metodológico. Su diseño se fundamenta en los criterios de validación de contenido propuestos por Hurtado de Barrera (2010) y Hernández Sampieri et al. (2014), adaptados al carácter técnico del presente Proyecto de Graduación.

C.1. Instrucciones para el experto evaluador

Estimado(a) experto(a), agradezco su disposición para participar en la validación del presente Proyecto de Graduación. A continuación, se le solicita valorar diez (10) criterios técnicos y metodológicos del diseño propuesto, empleando una escala tipo Likert de cinco (5) puntos, donde:

1 = Deficiente 2 = Regular 3 = Bueno 4 = Muy bueno 5 = Excelente

Al finalizar cada criterio, se dispone de un espacio para observaciones o sugerencias de mejora. La valoración estimada requiere entre quince (15) y veinte (20) minutos.

C.2. Datos de identificación del experto

Tabla 11

Información del experto

Dato	Información
Nombre	
Grado académico	

Dato	Información
Institución	
Cargo Actual	
Años de experiencia en el área	
Correo electrónico	
Fecha de evaluación	

Nota. Datos que debe completar el experto antes de iniciar la evaluación.

C.3. Rúbrica de valoración

Tabla 12

Instrumento de validación por juicio de expertos

N.º	Criterios de evaluación	1	2	3	4	5	Observaciones
1	Pertinencia y relevancia del problema planteado en el contexto panameño						
2	Claridad, coherencia y alcance de los objetivos general y específicos						
3	Solidez y actualidad del marco teórico y normativo (ISO/IEC 27001, ISO/SAE 21434, 3GPP)						
4	Adecuación de la arquitectura física propuesta (postes autónomos, LTE/5G, LoRaWAN, fibra óptica)						
5	Adecuación de la arquitectura lógica, segmentación VLAN y plan de direccionamiento VLSM						

N.º	Criterios de evaluación	1	2	3	4	5	Observaciones
6	Robustez de los mecanismos de redundancia y conmutación automática (HSRP, OSPF, SD-WAN)						
7	Solidez de la capa de seguridad bajo enfoque de Confianza Cero (PKI, IDS/IPS, cifrado extremo a extremo)						
8	Pertinencia del esquema de Calidad de Servicio (QoS) para priorización del tráfico V2X (Vehicle to Everything)						
9	Idoneidad de la validación funcional por simulación en Cisco Packet Tracer como prueba de concepto						
10	Viabilidad técnica del despliegue por fases y aporte del proyecto a la infraestructura crítica nacional						

Nota. Realizada con base en Hurtado de Barrera (2010) y Hernández Sampieri et al. (2014). Marque con una equis (X) la casilla correspondiente a su valoración.

C.4. Valoración global del instrumento

Tabla 13

Valoración general del diseño

N.º	Criterios de evaluación	Marcar
1	Aplicable sin modificaciones: El diseño es técnicamente sólido y puede avanzar a su siguiente fase.	
2	Aplicable con modificaciones menores: El diseño es adecuado, pero requiere ajustes puntuales.	

N.º	Criterios de evaluación	Marcar
3	Requiere modificaciones sustanciales: El diseño necesita revisión de aspectos estructurales antes de avanzar.	
4	No aplicable: El diseño requiere una reformulación integral.	

Nota. Marque con una equis (X) la opción que mejor refleje su valoración integral del diseño propuesto.

C.5. Observaciones generales y recomendaciones

(Espacio para que el experto redacte observaciones cualitativas, sugerencias de mejora o comentarios sobre aspectos no cubiertos por los criterios anteriores)

C.6. Declaración

Declaro haber revisado el Proyecto de Graduación titulado "Diseño de una Red de Comunicaciones Redundante y Segura para la Autopista Inteligente Panamá-Colón", elaborado por el estudiante Gerardo Gabriel Llorente Muñoz, y consigno mi valoración según los criterios establecidos en el presente instrumento.

Firma: _____

Nombre: _____ Fecha: _____

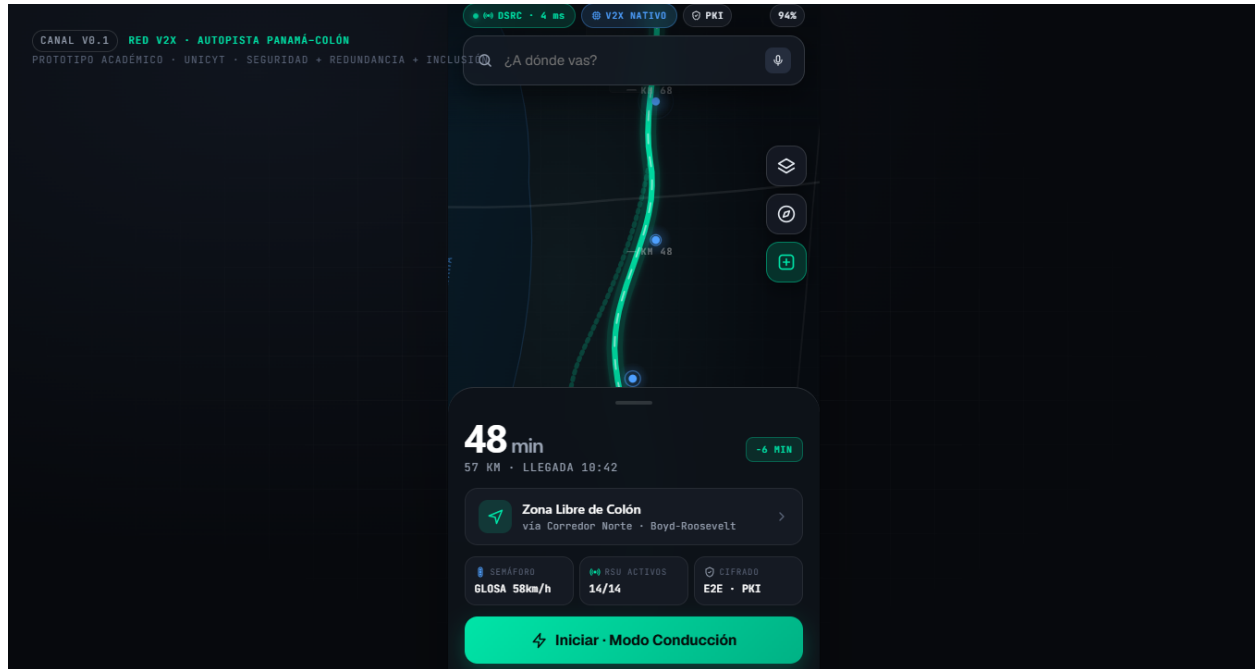
Anexo D. Prototipo visual de la aplicación móvil colaborativa

El presente anexo compila las capturas del prototipo de interfaz gráfica de la aplicación móvil colaborativa descrita en la sección 4.10, desarrollado como referencia visual del modelo funcional propuesto. Las capturas ilustran las principales funcionalidades: navegación con integración V2X, reporte colaborativo de incidentes, modo de conducción activa con alertas en tiempo real, panel de estado de la red de comunicaciones y el módulo de participación del conductor.

Este prototipo constituye una representación conceptual de la experiencia de usuario prevista para el despliegue, y no representa una versión operativa de la aplicación.

Figura 8

Pantalla principal de navegación con integración V2X



Nota. Vista principal de la aplicación mostrando la ruta activa hacia Zona Libre de Colón, con indicadores de estado de la red (DSRC, V2X Nativo, PKI), tiempo estimado de llegada, RSU activos y modalidad de cifrado extremo a extremo (E2E-PKI).

Figura 9

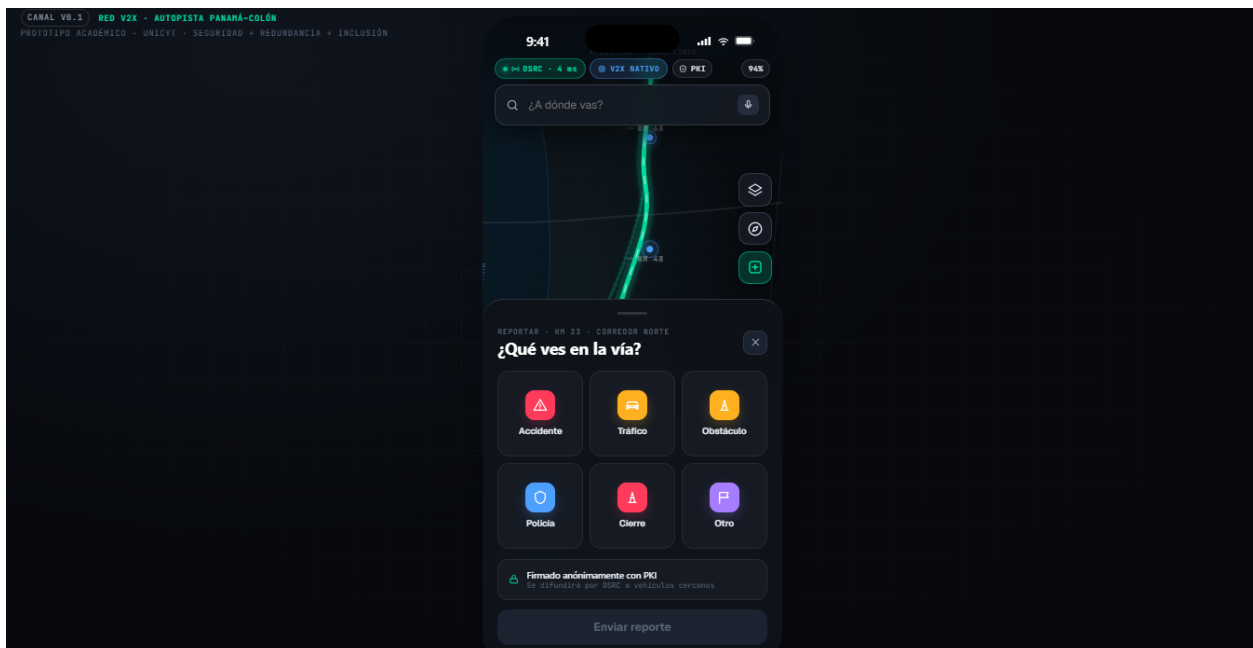
Modo conducción activa con alertas V2X en tiempo real



Nota. Interfaz del modo conducción mostrando velocidad actual, recomendación GLOSA (Green Light Optimal Speed Advisory) y notificación V2X de vía despejada, recibida de los postes inteligentes desplegados en la Autopista Panamá-Colón (Don Alberto Motta).

Figura 10

Módulo de reporte colaborativo de incidentes

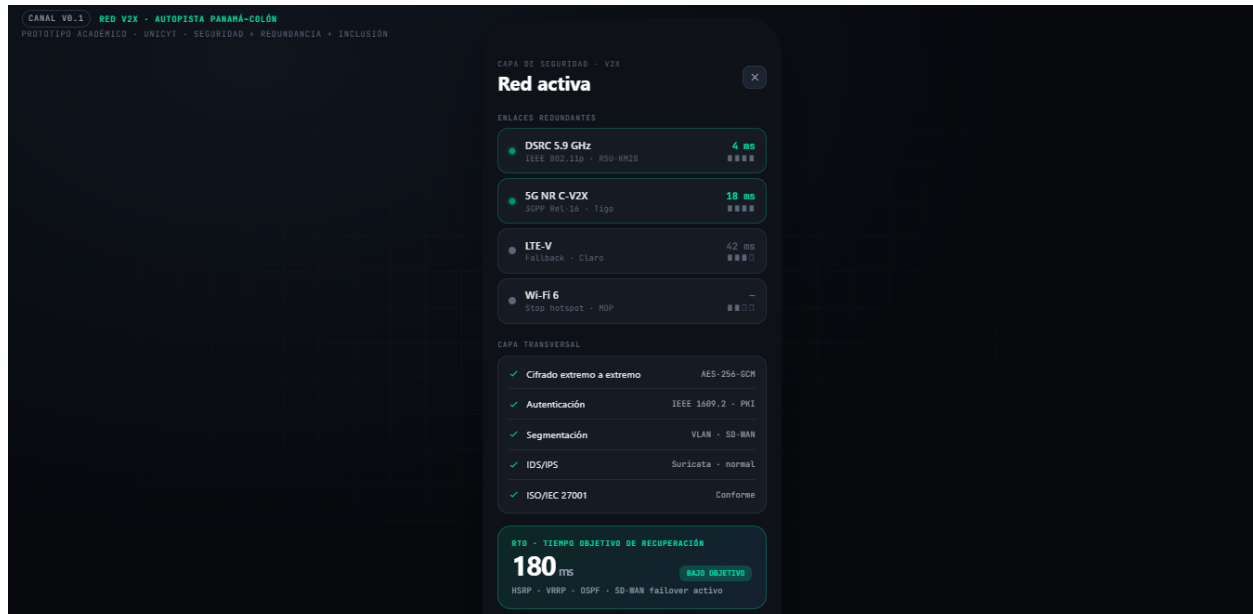


Nota. Pantalla de reporte del usuario, que permite notificar accidentes, tráfico, obstáculos, controles

policiales, cierres viales u otros eventos. Los reportes se firman anónimamente mediante PKI y se difunden vía DSRC a los vehículos cercanos, garantizando la privacidad conforme a la Ley 81 de 2019.

Figura 11

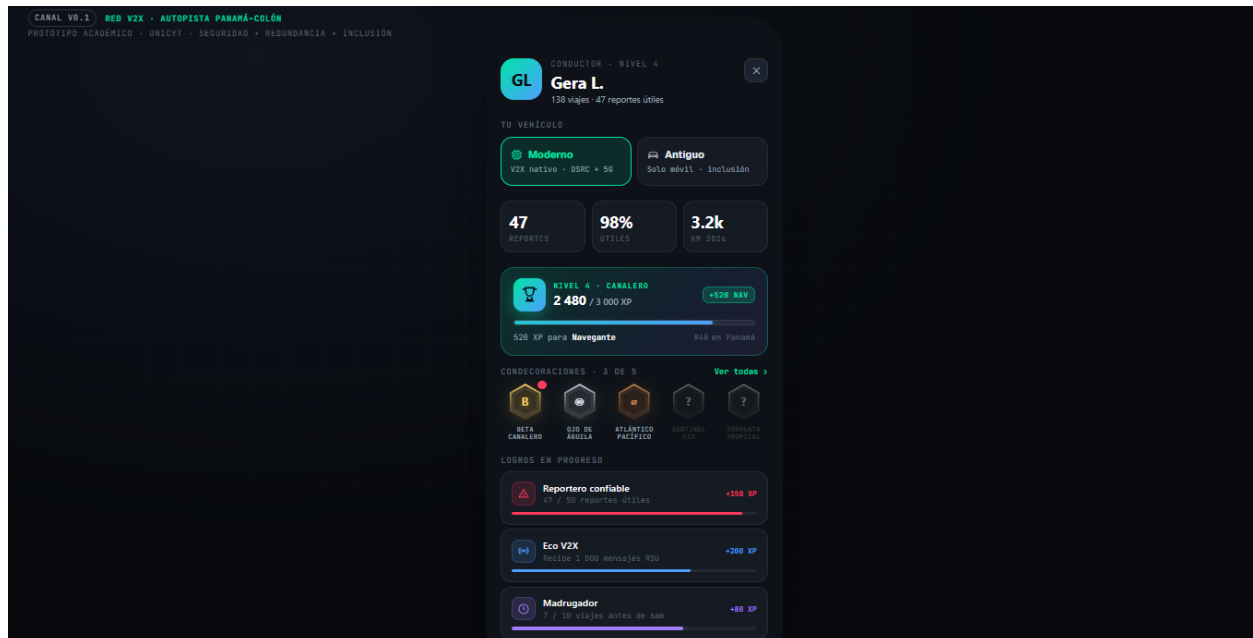
Panel de estado de la red y capa transversal de seguridad



Nota. Vista técnica del estado de los enlaces redundantes (DSRC 5.9 GHz, 5G NR C-V2X, LTE-V y Wi-Fi 6), los mecanismos de seguridad activos (cifrado AES-256-GCM, autenticación IEEE 1609.2-PKI, segmentación VLAN, IDS/IPS Suricata, conformidad ISO/IEC 27001) y el indicador de Tiempo Objetivo de Recuperación (RTO) del sistema.

Figura 12

Perfil del conductor y sistema de participación colaborativa



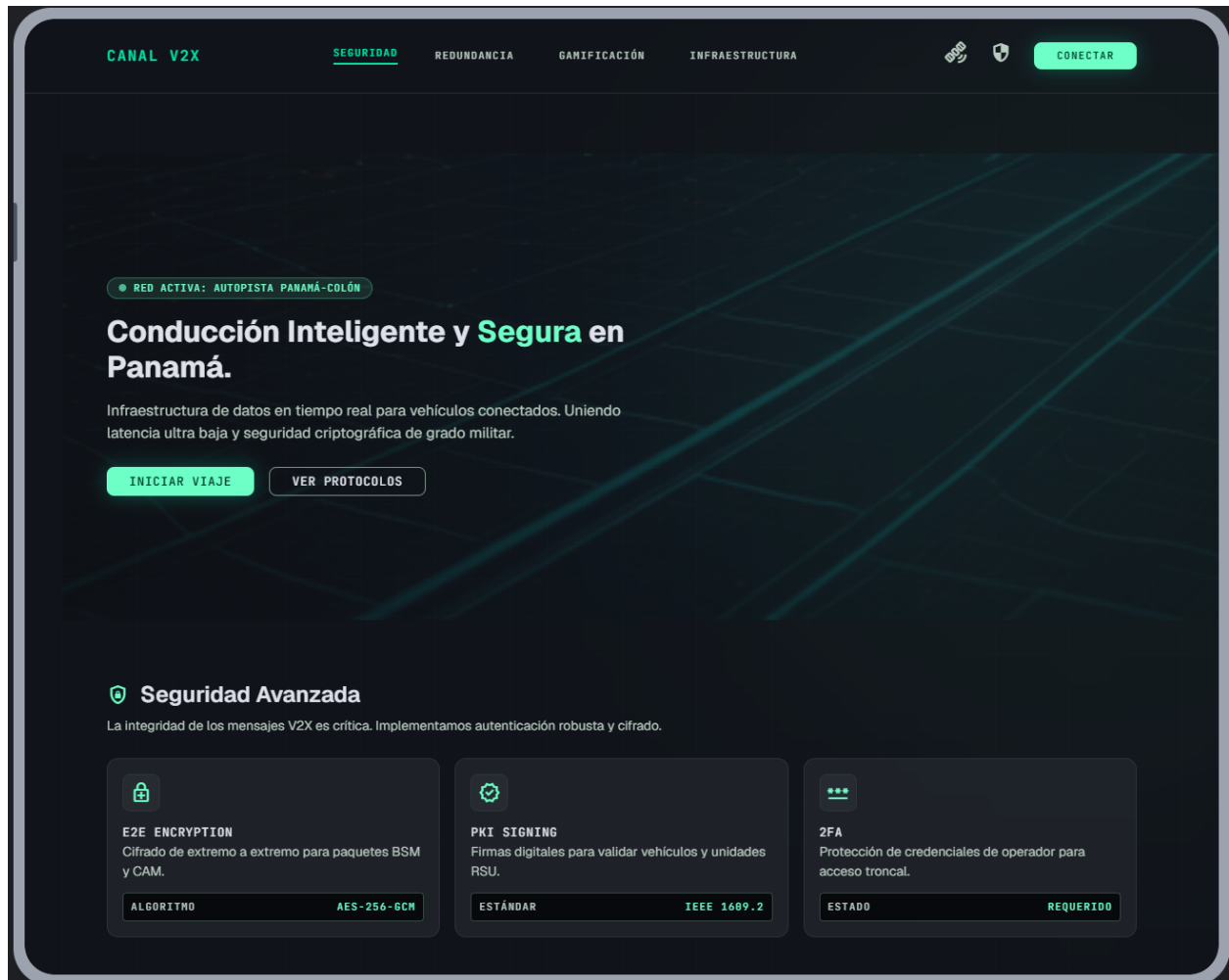
Nota. Módulo de perfil del usuario que incentiva la participación mediante niveles, condecoraciones y logros progresivos. Este componente materializa el principio de inclusión tecnológica, permitiendo la participación equitativa de conductores de vehículos con y sin capacidades V2X nativas.

Anexo E. Prototipo visual de la página web institucional

El presente anexo compila las capturas del prototipo de la página web institucional del proyecto, denominada Canal V2X, referida en la sección 1.3 como componente complementario de la solución. La página web cumple una función de presentación institucional del proyecto y de portal de acceso a documentación técnica, protocolos V2X, información de la infraestructura desplegada y conexión con la aplicación móvil colaborativa.

Figura 13

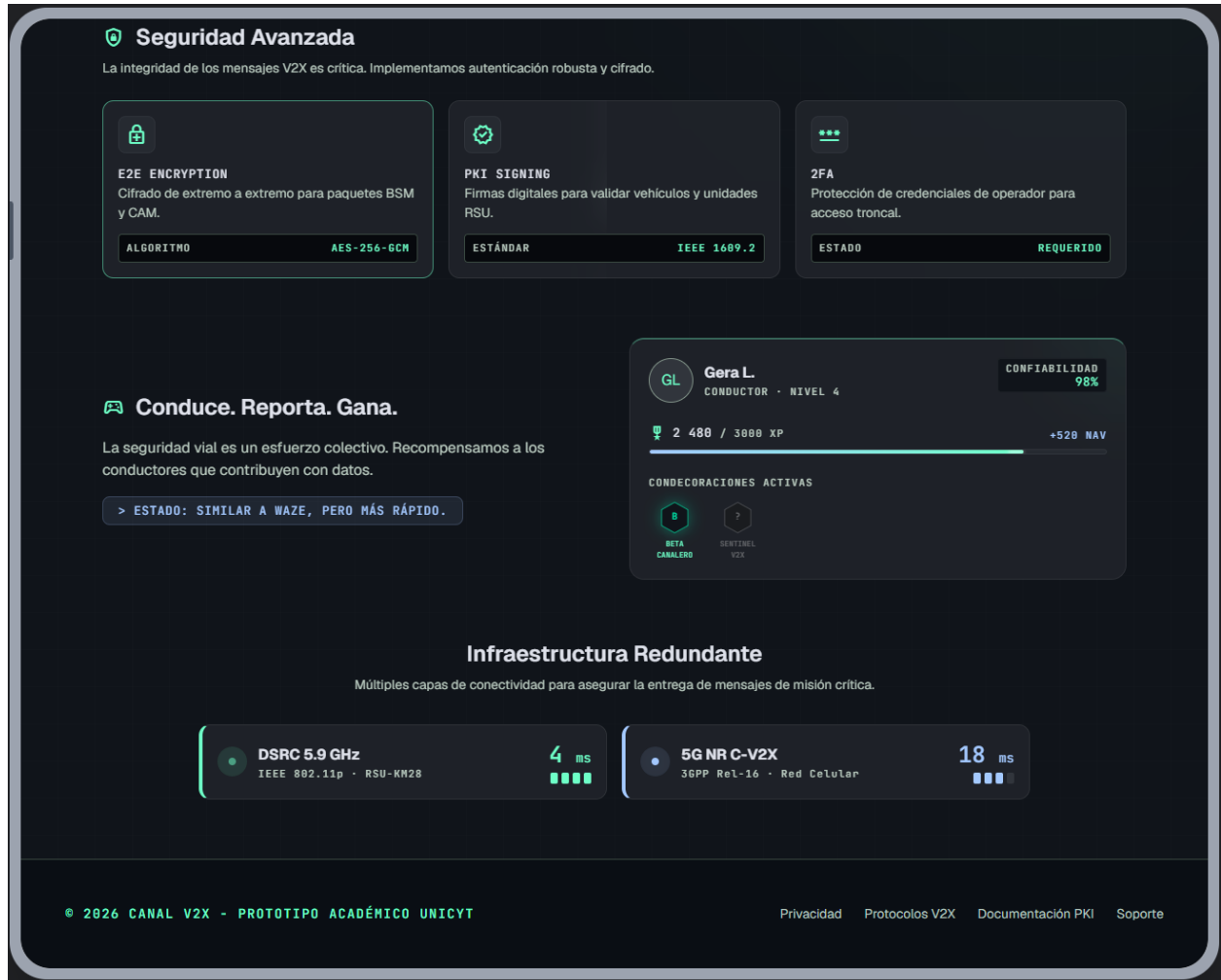
Página principal del portal Canal V2X



Nota. Vista de bienvenida del portal Canal V2X, que presenta la propuesta de conducción inteligente y segura sobre la Autopista Panamá-Colón. Incluye indicador de red activa, accesos rápidos a las secciones principales (Seguridad, Redundancia, Gamificación e Infraestructura) y llamadas a la acción para iniciar viaje o consultar los protocolos técnicos.

Figura 14

Módulos de seguridad, gamificación e infraestructura redundante del portal



Nota. Vista de las secciones internas del portal, donde se detallan los componentes de seguridad de la capa V2X (cifrado E2E AES-256-GCM, firmas digitales PKI bajo el estándar IEEE 1609.2 y doble factor de autenticación), el módulo de participación colaborativa del conductor y la infraestructura redundante de conectividad (DSRC 5.9 GHz y 5G NR C-V2X).