Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. ISSN 1317-6781
Caracas, Nº 72. Edición especial, octubre 2026: 343 – 353
https://n2t.net/ark:/42414/banih/722026/183

RESILIENCIA Y RECUPERACIÓN FUNCIONAL DE INFRAESTRUCTURAS DE TELECOMUNICACIONES ANTE DESASTRES AMBIENTALES: UN ENFOQUE DE INGENIERÍA Y GOBERNANZA

José María de VIANA[1]

RESUMEN

El diseño convencional en ingeniería estructural y de telecomunicaciones, enfocado exclusivamente en salvaguardar la vida mediante la prevención del colapso físico de las obras, resulta insuficiente ante eventos destructivos de gran magnitud. La pérdida prolongada de los servicios digitales interrumpe la coordinación operativa, suprime la conciencia situacional y multiplica las pérdidas de vidas humanas durante las fases críticas de emergencia y estabilización. El presente trabajo examina la vulnerabilidad intrínseca de las redes móviles en Venezuela frente a amenazas geológicas e hidrometeorológicas recurrentes, fundamentando la necesidad técnica de garantizar su continuidad operativa antes, durante y después del impacto de una catástrofe. Se formaliza la evolución doctrinaria hacia el principio de Recuperación Funcional (Functional Recovery) sustentado en el marco conceptual 3R (Confiabilidad, Robustez y Resiliencia). Asimismo, se evalúan los cuatro pilares de innovación tecnológica que transforman las redes móviles contemporáneas frente a las plataformas de generaciones previas: enlaces troncales satelitales en órbita baja (LEO), virtualización y desagregación lógica de funciones de red (NFV/SDN), almacenamiento electroquímico en litio-ferrofosfato (LiFePO4) y microrredes híbridas renovables con capacidad de operación en modo isla. A partir de la evidencia forense de fallas globales y el desempeño de arquitecturas tácticas desplegables, se formulan recomendaciones técnicas y regulatorias orientadas a consolidar un hábitat construido resiliente y fundamentado en la estabilidad ininterrumpida de sus líneas de vida.

ABSTRACT

Resilience and Functional Recovery of Telecommunications Infrastructures against Environmental Disasters: A Multilayer Engineering and Governance Approach

Conventional design in structural and telecommunications engineering, primarily oriented toward life safety through the prevention of physical collapse, proves insufficient during major environmental disasters. Prolonged outages of digital services disrupt command coordination, eliminate situational awareness, and aggravate casualty rates during critical emergency and stabilization windows. This research analyzes the intrinsic vulnerability of mobile cellular networks across the Venezuelan territory under recurrent seismic and hydrometeorological hazards, establishing the imperative engineering requirement of ensuring operational continuity before, during, and after catastrophic impacts. A doctrinal transition toward Functional Recovery is formalized under the 3R conceptual framework (Reliability, Robustness, and Resilience). Furthermore, this study evaluates the four technological pillars distinguishing modern mobile architectures from legacy networks: Low Earth Orbit (LEO) satellite backhauling, logical disaggregation through network function virtualization and software-defined networking (NFV/SDN), advanced lithium iron phosphate (LiFePO4) energy storage, and hybrid renewable microgrids with islanding capability. Grounded in international forensic failure analyses and field validations of tactical deployable networks, engineering standards and public governance guidelines are established to guarantee a resilient built environment supported by uninterruptible critical lifelines.

Palabras clave: Resiliencia de infraestructuras, recuperación funcional, redes móviles de emergencia, amenazas socionaturales, soporte vital, constelaciones LEO.
Keywords: Infrastructure resilience, functional recovery, emergency mobile networks, socio-natural hazards, critical lifelines, LEO constellations.

Capítulo I: Venezuela, Territorio de Amenazas Naturales y la Necesidad de Permanencia del Servicio Móvil

La ubicación geográfica y la dinámica geodinámica de Venezuela sitúan al territorio nacional en una condición de exposición permanente a múltiples amenazas socionaturales de alta intensidad destructiva (CARTAYA et al. 2006). En el contexto sismotectónico, la interacción cinemática transcurrente dextral entre la placa del Caribe y la placa Sudamericana estructura un corredor de deformación cortical activo a lo largo de los sistemas de fallas de Boconó en la

[1] Ingeniero Civil. Profesor de la Universidad Católica Andrés Bello. Expresidente de Hidrocapital y de Movilnet. Miembro de la Comisión de Infraestructura de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. Correo-e.: josedeviana@gmail.com

cordillera andina, San Sebastián en la cordillera de la Costa y El Pilar en la serranía oriental (OPS y CRID 1997, CARTAYA et al. 2006). Esta franja sismogénica coincide geográficamente con los núcleos de mayor concentración urbana, económica e industrial del país, donde habita más del 80% de la población nacional (CARTAYA et al. 2006, ANIH 2024). Simultáneamente, el régimen hidrometeorológico tropical expone las cuencas de montaña a precipitaciones extremas detonadas por la convergencia intertropical, ondas tropicales del Atlántico y vaguadas en altura (SUÁREZ RUIZ y PACHECO GIL 2008, CRUZ ROJA VENEZOLANA 2022). La interacción entre pendientes abruptas con mantos de alteración profunda y acumulaciones pluviométricas extraordinarias genera recurrentes procesos de remoción en masa, flujos de detritos y aludes torrenciales de rápida propagación en valles densamente poblados (CARTAYA et al. 2006, ANIH 2024).

La recurrencia histórica de eventos catastróficos en el país ilustra la fragilidad de las líneas de vida y los sistemas de transporte físico y digital. El 9 de julio de 1997, el Terremoto de Cariaco, con una magnitud sísmica de Mw 6,8 (mb 5,7) y una profundidad focal de 10 km en el estado Sucre, causó el colapso estructural de edificaciones de concreto armado en Cumaná y Cariaco, daños severos en centros de salud y la fractura de aducciones maestras de agua potable como la de la presa de Clavellinos, registrando entre 67 y 78 víctimas fatales, más de 500 heridos y 5.000 damnificados (OPS y CRID 1997). La destrucción de la planta externa y la saturación de los canales conmutados de telefonía fija y móvil aislaron la zona durante las horas iniciales, retrasando las operaciones de auxilio (OPS y CRID 1997).

Dos años más tarde, entre el 14 y el 16 de diciembre de 1999, la Tragedia de Vargas evidenció el poder devastador de los fenómenos hidrometeorológicos acoplados (SUÁREZ RUIZ y PACHECO GIL 2008). Un acumulado extraordinario de 911 mm de lluvia en la estación Maiquetía saturó los perfiles de meteorización en el macizo de El Ávila, desatando coladas de barro torrenciales que arrasaron la franja costera (SUÁREZ RUIZ y PACHECO GIL 2008). Las radiobases celulares y los cables troncales de fibra óptica tendidos en márgenes viales fueron destruidos mecánicamente, dejando al estado Vargas en una condición de incomunicación absoluta que paralizó la logística de evacuación (SUÁREZ RUIZ y PACHECO GIL 2008).

La vulnerabilidad en las cuencas andinas y valles centrales ha sido ratificada de manera sistemática en las décadas siguientes (CARTAYA et al. 2006). En febrero del 2005, una vaguada atmosférica estacionaria provocó el desbordamiento del río Mocotíes en el estado Mérida, anegando con flujos torrenciales las poblaciones de Santa Cruz de Mora, Tovar, Bailadores y Zea, dejando decenas de fallecidos y miles de viviendas destruidas junto al corte de los servicios eléctricos y de telecomunicaciones Entre la noche del 23 y la madrugada del 24 de agosto de 2021, las intensas precipitaciones provocaron nuevamente el desbordamiento del río Mocotíes y múltiples deslaves en la región, afectando gravemente al estado Mérida —en especial al municipio Tovar y a otras localidades del Valle del Mocotíes

Posteriormente, el 8 de octubre de 2022, la combinación de la Onda Tropical N° 41 con una vaguada en altura descargó 108 litros por metro cuadrado en pocas horas sobre el estado Aragua, detonando el deslave de Las Tejerías tras el desbordamiento simultáneo de las quebradas Los Patos y Curiepe (ALIANZA REBELDE INVESTIGA 2022, CRUZ ROJA VENEZOLANA 2022). La riada de lodo y bloques rocosos destruyó la infraestructura urbana e industrial, provocando entre 36 y 50 víctimas fatales, 56 desaparecidos y el colapso de 800 viviendas, en un escenario donde la ausencia de conectividad móvil impidió la difusión oportuna de alertas aguas abajo y complicó las tareas iniciales de salvamento (CRUZ ROJA VENEZOLANA 2022).

Los análisis prospectivos y ejercicios de contingencia subrayan la magnitud potencial de los impactos esperados en el país (CÁRITAS DE VENEZUELA 2006, OPS y OMS 2006). Los balances oficiales informados por las autoridades gubernamentales situaron la cifra de víctimas en más de 1.700 personas fallecidas, 5.034 heridos, más de 15.866 damnificados albergados, el colapso de centros asistenciales de alta complejidad, la paralización del Metro de Caracas y la clausura operativa del Aeropuerto Internacional de Maiquetía (OPS y OMS 2006, REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA 2006). En tales circunstancias, la destrucción de puentes y carreteras convierte a las comunicaciones móviles en el único vector funcional viable para coordinar el mando institucional y la ayuda humanitaria (CÁRITAS DE VENEZUELA 2006).

La recurrencia descrita demuestra que los servicios de telecomunicaciones móviles no pueden ser concebidos como simples utilidades comerciales o de entretenimiento, sino como el soporte vital primario de la sociedad organizada (CISA 2023). La permanencia del servicio resulta imperativa a lo largo de las tres etapas de la gestión de desastres:

En la fase previa al evento catastrófico, las redes de datos móviles sustentan la recolección telemétrica de redes sismológicas, pluviométricas y de nivel de cauces, canalizando variables críticas hacia los centros de alerta temprana (CARTAYA et al. 2006). Durante el impacto directo, la telefonía móvil constituye la única vía a disposición de las víctimas para informar su paradero y estado, transmitir coordenadas exactas y permitir que los comités de operaciones de emergencia organicen las rutas seguras de penetración y el despliegue de los primeros respondedores (WETTERWALD et al. 2016, CISA 2023).

En la etapa posterior al evento, la estabilidad del servicio móvil determina la efectividad en la administración de refugios temporales y centros de triaje médico (CÁRITAS DE VENEZUELA 2006, OPS y OMS 2006). De igual forma, sustenta la aplicación de protocolos de ingeniería forense de emergencia, tales como la Evaluación Rápida de Daños en Edificaciones normalizada por la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat (ANIH 2024). A través de dispositivos móviles, los inspectores estructurales clasifican la habitabilidad

de las construcciones mediante etiquetas normalizadas (verde para inmuebles habitables, amarilla para acceso restringido y roja para estructuras inhabitables con riesgo inminente de colapso) y transmiten los formularios a los puestos de mando en tiempo real (ANIH 2024). Esta transmisión digital inmediata previene la reocupación de inmuebles inestables ante réplicas sísmicas, orienta el acordonamiento perimetral en fallas geológicas activas y coordina la suspensión selectiva del suministro de gas o electricidad para mitigar incendios secundarios (ANIH 2024).

Tabla 1. *Registro histórico y prospectivo de eventos socionaturales destructivos en Venezuela y su afectación sobre infraestructuras críticas de telecomunicaciones.*

Evento Histórico y Fecha	Vector Físico Detonante	Afectación Registrada en Infraestructuras Críticas	Consecuencias Humanas y Operativas	Fuente Documental Primaria
Terremoto de Cariaco (09/07/1997)	Sismo superficial de Mw 6,8 (mb 5,7), profundidad focal de 10 km.	Destrucción de edificaciones de concreto, viviendas y fractura de acueductos.	67 a 78 víctimas fatales, >500 heridos y 5.000 damnificados; retraso en auxilio externo.	OPS y CRID (1997)
Tragedia de Vargas (14-16/12/1999)	Precipitaciones récord con 911 mm acumulados en 72 horas.	Destrucción masiva de redes de transmisión, radiobases celulares y vialidad costera.	Incomunicación territorial absoluta, pérdidas humanas masivas y daños materiales incalculables.	SUÁREZ RUIZ y PACHECO GIL (2008)
Vaguada del Valle del Mocotíes (Febrero 2005)	Vaguada estacionaria con lluvias continuas de varios días.	Desbordamiento fluvial, colapso de puentes, redes eléctricas y centrales locales.	Decenas de fallecidos; poblaciones de Santa Cruz de Mora y Tovar aisladas por vía terrestre y digital.	TRAGEDIAS POR COLADAS DE BARRO... (s.f.)
Alud Torrencial de Tovar (Agosto 2021)	Lluvias convectivas locales de extrema intensidad horaria.	Arrastre de postes de telecomunicaciones y descalce de fundaciones de radiobases.	Pérdidas humanas, corte de datos e interrupción de la cadena de respuesta técnica en el valle.	TRAGEDIAS POR COLADAS DE BARRO... (s.f.)
Deslave de Las Tejerías (08/10/2022)	Precipitación crítica de 108 mm (Onda Tropical N° 41).	Destrucción mecánica de cables de fibra óptica y anegamiento de estaciones base.	36 a 50 fallecidos, 56 desaparecidos, 800 casas afectadas; paralización de coordinación inicial.	ALIANZA REBELDE INVESTIGA (2022), CRUZ ROJA VENEZOLANA (2022)
Escenario Sísmico Centro-Norte (24/06/2006)	Sismos concurrentes de magnitudes Mw 7,3 y Mw 7,5.	Daños en más de 2.500 estructuras, cierre de Maiquetía y parálisis del Metro de Caracas.	1.719 fallecidos, 5.034 heridos, 15.866 desplazados; Decreto N° 5.364 de Emergencia Nacional.	OPS y OMS (2006), REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA (2006)

Capítulo II: Innovación Tecnológica en Redes Móviles como Paradigma de Resiliencia en Zonas de Riesgo

Las redes celulares de generaciones anteriores (2G, 3G y 4G) fueron diseñadas bajo modelos topológicos centralizados y dependientes de infraestructura física rígida en tierra. Los enlaces de transporte troncal (backhaul) dependían exclusivamente de cableados de cobre, fibra óptica tendida en ductos vulnerables a deformaciones del suelo o radioenlaces terrestres de microondas montados en torres sin redundancia espacial (GUPTA et al. 2024, STEVENS et al. 2024). Asimismo, el procesamiento de las señales se ejecutaba en equipos físicos dedicados e integrados (Funciones de Red Físicas o PNF), lo que causaba que la caída estructural de un centro de conmutación dejara sin servicio a toda la región dependiente (ETSI 2015). Los esquemas de respaldo energético descansaban en bancos de baterías de plomo-ácido (VRLA), caracterizadas por su escasa densidad de energía, degradación térmica acelerada y una autonomía limitada a lapsos de 3 a 8 horas, complementadas por generadores diésel que se apagaban por desabastecimiento de combustible ante el bloqueo vial (ITU-T 2020, CISA 2023).

Frente a estas limitaciones estructurales, la ingeniería contemporánea ha reformulado el paradigma operativo hacia la Resiliencia por Diseño (*Resilience-by-Design*) (ALVES et al. 2020, CISA 2023). En zonas catalogadas como de alto riesgo socionatural, las redes móviles de última generación implementan esquemas descentralizados capaces de anticipar fallas, operar en condiciones parcialmente degradadas sin interrupción de servicios esenciales y ejecutar mecanismos de autorrecuperación dinámica (ETSI 2015). Esta transformación

estructural se sustenta en cuatro pilares tecnológicos de innovación:

El primer pilar lo constituye el despliegue de enlaces troncales mediante mega constelaciones satelitales en Órbita Terrestre Baja (LEO), tales como Starlink o Kuiper, equipadas con enlaces ópticos intersatelitales (ISL) (GUPTA et al. 2024, ORBYNEXA 2024). A diferencia de los satélites geoestacionarios tradicionales (GEO) ubicados a 36.000 km sobre el ecuador, cuyas distancias de propagación imponen retardos de ida y vuelta de 600 a 800 ms y anchos de banda sumamente restringidos y costosos (CHANG et al. 2013, ABDALLA 2025), los satélites LEO operan entre 500 y 1.000 km de altitud (STEVENS et al. 2024). Esta reducción física disminuye la latencia de transmisión en hasta dos órdenes de magnitud y entrega capacidades multimegabit de alta velocidad (COOMANS et al. 2024, GUPTA et al. 2024). Al integrarse como canales automáticos de respaldo (failover) en radiobases terrestres, las constelaciones LEO aseguran la supervivencia instantánea de la estación cuando los cables subterráneos de fibra óptica son seccionados por deslizamientos o fallas geológicas (STEVENS et al. 2024).

El segundo pilar reside en el desacoplamiento lógico y la virtualización de las arquitecturas celulares a través de la Virtualización de Funciones de Red (NFV), las Redes Definidas por Software (SDN) y la Nube de Acceso de Radio (C-RAN) (ETSI 2015, WETTERWALD et al. 2016). Al separar el software de control de las plataformas de hardware subyacente, la infraestructura adquiere capacidades de autorrecuperación (self-healing) (ETSI 2015). Si un servidor o nodo físico es destruido durante un sismo, el plano de control migra en caliente las funciones de red virtualizadas (VNFs) hacia nodos alternos en milisegundos, restableciendo el enrutamiento sin intervención física (ETSI 2015). De forma simultánea, las capacidades de particionamiento dinámico de red (network slicing) gestionadas mediante SDN permiten reservar porciones de ancho de banda exclusivas e inmunes a la congestión pública para los organismos de primera respuesta y seguridad ciudadana (WETTERWALD et al. 2016, TERCERO LOZANO et al. 2024).

El tercer pilar abarca la transición electroquímica hacia bancos de baterías de Litio-Ferrofosfato (LiFePO4) gestionados mediante Sistemas Inteligentes de Gestión de Baterías (BMS), conforme a la Recomendación ITU-T L.138 (ITU-T 2020, CISA 2023). La química de LiFePO4 ofrece alta densidad volumétrica y estabilidad estructural intrínseca, anulando el riesgo de embalamiento térmico (thermal runaway) en ambientes con temperaturas elevadas (ITU-T 2020). Su capacidad para admitir descargas profundas superiores al 90% sin pérdida prematura de capacidad de ciclo, combinada con velocidades de recarga acelerada, supera las debilidades de los antiguos bancos de plomo-ácido (ITU-T 2020). A través de telemetría digital continua, el BMS monitorea de forma remota el Estado de Carga (SOC) y el Estado de Salud (SOH) de cada celda, advirtiendo fallas inminentes y garantizando disponibilidad energética confiable (ITU-T 2020, CISA 2023).

El cuarto pilar consiste en el despliegue de Microrredes Híbridas de Energía Renovable (REHS) acopladas a Sistemas de Almacenamiento Energético en Baterías (BESS), diseñadas para operar de manera autónoma en «modo isla» (islanding) (CISA 2023). Mediante la integración de paneles solares fotovoltaicos, microgeneradores eólicos y controladores inteligentes, la radiobase se desacopla de la red de distribución eléctrica comercial durante eventos destructivos (CISA 2023). Al optimizar el uso de fuentes solares y almacenamiento en litio, el consumo de combustible diésel se reduce a un mínimo residual o de emergencia, extendiendo la supervivencia operativa continua del sitio celular sin requerir reabastecimiento logístico por vía terrestre (CISA 2023).

La convergencia de estos avances tecnológicos transforma el concepto de infraestructura pasiva en una red adaptativa y autónoma (ALVES et al. 2020, NEIGLOBE NETWORKS 2024). En escenarios donde las comunicaciones troncales terrestres colapsan, las radiobases evolucionadas adoptan capacidades de computación en el borde (Multi-access Edge Computing o MEC), conformando «Islas de Resiliencia» capaces de procesar tráfico local, registrar usuarios provisionalmente y sostener enlaces de emergencia entre brigadistas aun en aislamiento total respecto al núcleo central de red (ALVES et al. 2020, NEIGLOBE NETWORKS 2024).

Tabla 2. *Comparación paramétrica entre redes celulares convencionales y arquitecturas móviles resilientes de última generación.*

Parámetro Operativo	Redes Celulares Tradicionales (Generaciones 2G/3G)	Redes Móviles Resilientes Contemporáneas	Estándar o Referencia Técnica
Topología de Backhaul	Conexión física rígida por fibra terrestre o microondas en cadena sin redundancia espacial.	Backhaul híbrido multicapa con conmutación automática (*failover*) a mega constelaciones LEO.	GUPTA et al. (2024), STEVENS et al. (2024)
Latencia Satelital	Elevada latencia en órbita geoestacionaria (600 a 800 ms), inviable para flujos tácticos en tiempo real.	Reducción de hasta dos órdenes de magnitud (inferior a 40 ms) mediante órbitas bajas.	CHANG et al. (2013), COOMANS et al. (2024)
Arquitectura de Red	Funciones de red físicas fijadas rígidamente a plataformas de hardware propietario (PNF).	Virtualización completa (NFV, SDN y C-RAN) con autorrecuperación dinámica en milisegundos.	ETSI (2015)

Parámetro Operativo	Redes Celulares Tradicionales (Generaciones 2G/3G)	Redes Móviles Resilientes Contemporáneas	Estándar o Referencia Técnica
Priorización de Tráfico	Enrutamiento estático con saturación y bloqueo generalizado durante situaciones de pánico.	Particionamiento dinámico (*network slicing*) priorizado para canales de mando y rescate.	WETTERWALD et al. (2016), TERCERO LOZANO et al. (2024)
Almacenamiento Energético	Baterías de plomo-ácido (VRLA), baja tolerancia a descargas profundas y degradación térmica.	Baterías LiFePO4 bajo norma ITU-T L.138 con BMS y telemetría de monitoreo de SOC y SOH.	ITU-T (2020), CISA (2023)
Autonomía en Contingencia	3 a 8 horas de baterías; grupos electrógenos vulnerables al bloqueo vial en 24 a 72 horas.	Microrredes híbridas en modo isla con autonomía energética extendida de 10 a más de 17 días continuos.	CISA (2023)
Continuidad en Aislamiento	Inoperatividad total de la celda al interrumpirse la comunicación con el centro de conmutación.	Operación autónoma en el borde mediante MEC («Islas de Resiliencia») para tráfico local.	ALVES et al. (2020), NEIGLOBE NETWORKS (2024)

Capítulo III: Evolución Doctrinaria y el Marco Conceptual 3R: De la Preservación de la Vida a la Recuperación Funcional

Durante décadas, la ingeniería estructural y el diseño sismorresistente han fundamentado sus exigencias en el principio de Preservación de la Vida (*Life Safety*) (EVANS y MCGHIE 2011, PESCAROLI y ALEXANDER 2016). La filosofía central de los códigos normativos ha consistido en dotar a las estructuras de suficiente resistencia y ductilidad para absorber la energía inducida por el sismo de diseño, evitando el colapso gravitacional total a costa de aceptar deformaciones inelásticas y daños severos en elementos resistentes y no estructurales (EVANS y MCGHIE 2011). Si bien este enfoque garantiza la evacuación y reduce la mortalidad directa durante el movimiento sísmico, la experiencia técnica acumulada demuestra que resulta insuficiente tratándose de infraestructuras críticas y líneas de soporte vital (PESCAROLI y ALEXANDER 2016).

Una estación de telecomunicaciones o una central de datos puede conservar su integridad estructural básica y permanecer en pie tras un sismo, pero quedar completamente fuera de servicio debido al volcamiento de bastidores de control, rotura de acometidas eléctricas, desacoplamiento de bandejas de cables o pérdida de enlaces por desalineación de antenas direccionales (EVANS y MCGHIE 2011, ALVES et al. 2020). La inoperatividad funcional de las telecomunicaciones desencadena fallas en cadena en otros servicios públicos y priva a la población de asistencia en el lapso posterior al desastre, multiplicando las pérdidas humanas y materiales (PESCAROLI y ALEXANDER 2016).

Esta contradicción ha impulsado una transformación doctrinaria hacia el principio de Recuperación Funcional (Functional Recovery) (ALVES et al. 2020, CISA 2023). Bajo este enfoque, las obras de infraestructura crítica deben ser calculadas, diseñadas y construidas para preservar o restablecer sus funciones esenciales dentro de un umbral temporal tolerable posdesastre (PESCAROLI y ALEXANDER 2016, ALVES et al. 2020). La recuperación funcional desplaza el concepto pasivo de supervivencia física hacia la continuidad activa del servicio, estructurándose sobre el marco conceptual 3R (ALVES et al. 2020):

La **Confiabilidad** (*Reliability*) representa el desempeño nominal exento de errores de los componentes de hardware, enlaces de transmisión y plataformas lógicas bajo regímenes ambientales y operacionales habituales, garantizando disponibilidades de servicio continuo acordes con el estándar de «cinco nueves» (99,999%) (ETSI 2015, ALVES et al. 2020).

La Robustez (Robustness) constituye la capacidad intrínseca de los elementos estructurales, envolventes y apoyos electromecánicos para absorber y soportar sobrecargas dinámicas calculadas —tales como aceleraciones espectrales pico, empujes hidrodinámicos por crecidas o presiones de viento ciclónico— sin sufrir fracturas, fallas frágiles ni colapsos mecánicos (EVANS y MCGHIE 2011, PESCAROLI y ALEXANDER 2016).

La **Resiliencia** (*Resilience*) define la propiedad adaptativa del sistema en su conjunto para absorber perturbaciones imprevistas que excedan los límites de diseño, experimentar una degradación elegante del servicio, activar de forma inmediata mecanismos autónomos de contingencia y reconstituir los niveles nominales de operación en plazos reducidos (PESCAROLI y ALEXANDER 2016, ALVES et al. 2020).

Capítulo IV: Soporte Vital e Interdependencia Sistémica de las Líneas de Vida

Las telecomunicaciones contemporáneas han trascendido la condición de sector aislado para consolidarse como la meta-infraestructura o «sistema nervioso central» que gobierna la operatividad del conjunto de líneas de soporte vital del hábitat moderno (PESCAROLI y ALEXANDER 2016, CISA 2023). Los centros hospitalarios y las redes de generación y

transmisión eléctrica dependen críticamente del intercambio continuo de paquetes de datos y de la telemetría remota para sostener sus funciones básicas (CISA 2023, ABDALLA 2025).

Entre el sistema eléctrico de potencia y las redes celulares de telecomunicaciones existe un acoplamiento bidireccional que, en situaciones de catástrofe, desencadena un bucle destructivo en cascada (EVANS y MCGHIE 2011, PESCAROLI y ALEXANDER 2016). Cuando un sismo mayor o un alud torrencial derriba las líneas de transmisión eléctrica de alta y media tensión, las radiobases celulares conmutan de forma automática a sus fuentes de energía de respaldo (EVANS y MCGHIE 2011). En aquellas instalaciones no provistas de sistemas avanzados de microgeneración, los bancos de baterías tradicionales agotan su carga produciendo la desconexión simultánea de extensas zonas de cobertura (EVANS y MCGHIE 2011, CISA 2023).

A partir de ese instante se activa el ciclo de falla inversa: sin red móvil operativa, los centros de despacho de las empresas eléctricas quedan ciegos ante la pérdida de telemetría de sus subestaciones y pierden la comunicación con sus cuadrillas de reparación en campo (PESCAROLI y ALEXANDER 2016, ABDALLA 2025). La imposibilidad de coordinar la logística de transporte de combustible y priorizar los trabajos en circuitos averiados retrasa la restitución del servicio eléctrico generalizado, lo que a su vez profundiza y prolonga el apagón del sistema celular (EVANS y MCGHIE 2011, CISA 2023).

La anulación de las comunicaciones móviles lesiona la capacidad de respuesta humanitaria e institucional en cuatro dimensiones fundamentales (BANCO MUNDIAL y UIT s.f., PESCAROLI y ALEXANDER 2016): En el plano de las decisiones estratégicas, los comités de crisis y comando quedan privados de información agregada en tiempo real para dimensionar el siniestro (BANCO MUNDIAL y UIT s.f.). En el nivel logístico y territorial, los reportes de daños, necesidades de medicamentos y colapso de vías no alcanzan las salas situacionales (CÁRITAS DE VENEZUELA 2006, HELP.NGO 2024). En la dimensión de la conciencia situacional táctica, los equipos de bomberos y defensa civil operan de forma aislada, careciendo de cartografía georreferenciada de riesgos o coordenadas de sobrevivientes (WETTERWALD et al. 2016, ANIH 2024). Finalmente, en la esfera comunitaria, la población pierde el acceso a las líneas de emergencia (911) y a las directrices oficiales de seguridad, desatando pánico e impidiendo evacuaciones ordenadas (UIT s.f.).

Este colapso cobra especial gravedad durante las denominadas «Horas Doradas», correspondientes a las primeras 24 a 48 horas posteriores al evento (PESCAROLI y ALEXANDER 2016, HELP.NGO 2024). La experiencia internacional y nacional documenta que la probabilidad de extraer víctimas con vida en estructuras colapsadas o áreas anegadas disminuye drásticamente con cada hora transcurrida (OPS y OMS 2006, HELP.NGO 2024). La disponibilidad ininterrumpida de enlaces móviles de banda ancha durante este intervalo resulta decisiva para transmitir imágenes aéreas desde drones térmicos, coordinar intervenciones de telemedicina sobre pacientes traumatizados y desplegar modelos tridimensionales de escombros que guíen el apuntalamiento mecánico (ANIH 2024, FIGARO et al. 2026).

Capítulo V: Análisis Forense de Mecanismos de Falla en Cascada ante Eventos Destructivos

El análisis retrospectivo de catástrofes ambientales permite categorizar los mecanismos físicos, mecánicos y electromagnéticos que inducen la parálisis de las redes de comunicaciones móviles (EVANS y MCGHIE 2011, PESCAROLI y ALEXANDER 2016). Desde el punto de vista mecánico, los movimientos tectónicos a lo largo de planos de falla, los asentamientos diferenciales de suelo y los flujos de detritos generan esfuerzos de corte y tracción que exceden la resistencia última de los ductos subterráneos de fibra óptica y los anclajes de torres (CARTAYA et al. 2006, EVANS y MCGHIE 2011). Adicionalmente, las aceleraciones sísmicas horizontales inducen vibraciones armónicas que fracturan soportes de antenas y alteran la orientación geométrica de los radioenlaces de microondas, quebrando la conectividad troncal por pérdida de alineación en la línea de vista (EVANS y MCGHIE 2011, ALVES et al. 2020).

En el ámbito electromagnético, las perturbaciones atmosféricas extremas inducen una severa atenuación por lluvia (rain fade) (SAMAD et al. 2021). De acuerdo con las formulaciones físicas establecidas en las Recomendaciones ITU-R P.618 e ITU-R P.838, las gotas de agua en regímenes de precipitación torrencial actúan como centros de absorción y dispersión dieléctrica de las ondas electromagnéticas a frecuencias superiores a los 10 GHz (SAMAD et al. 2021). Durante tormentas convectivas severas, vaguadas y huracanes, las bandas de microondas y enlaces satelitales convencionales que operan en rangos Ku (12–18 GHz) y Ka (26–40 GHz) experimentan una reducción drástica en la relación señal a ruido, traduciéndose en una pérdida de capacidad de transferencia de datos de entre un 37% y un 50% (SAMAD et al. 2021, COOMANS et al. 2024). Esta degradación ocurre precisamente en los instantes de mayor intensidad pluvial, anulando el tráfico satelital convencional (SAMAD et al. 2021). Por el contrario, los enlaces que operan en rangos de frecuencia inferiores a 10 GHz, tales como la Banda C (4–8 GHz), demuestran una disponibilidad de enlace superior al 99,9% bajo las condiciones de precipitación más severas (CHANG et al. 2013, SAMAD et al. 2021).

Tabla 3. *Mecanismos físicos de falla, vulnerabilidad electromagnética e impacto en telecomunicaciones documentados en desastres mayores a escala global.*

Evento Histórico y Ubicación	Vector de Amenaza Físico	Mecanismo Primario de Falla en Infraestructura	Impacto Específico en Telecomunicaciones	Referencia Documental
Maule, Chile (2010)	Sismo Mw 8,8 y tsunami costero.	Colapso del Sistema Interconectado Central; agotamiento de bancos de baterías en 3 a 8 horas.	Aislamiento interregional; imposibilidad de coordinar suministro de diésel e inspección eléctrica.	EVANS y MCGHIE (2011)
Tohoku, Japón (2011)	Megaterremoto Mw 9,0-9,1 y tren de olas.	Anegamiento por agua marina de cuartos de potencia, corte de fibra óptica en puentes colapsados.	Más de 9.000 estaciones base fuera de servicio; aislamiento de centros de evacuación.	ITU-T y NTT (2015), SAKANO et al. (2019)
Katrina y Sandy, EE. UU. (2005 / 2012)	Vientos con fuerza de huracán e inundaciones de marea.	Inundación de cuartos de conmutación en sótanos; colapso de mástiles y falta de interoperabilidad.	Retrasos críticos en evacuación médica y rescate humanitario en zonas costeras.	CHANG et al. (2013), CISA (2023)
Amatrice y Emilia-Romagna, Italia (2016 / 2023)	Sismo intraplaca / Lluvias torrenciales continuas.	Cizallamiento de fibras troncales en pasos de montaña / Destrucción de armarios de distribución por lodo.	Localidades montañosas incomunicadas por días; bloqueo de operaciones de rescate acuático.	PESCAROLI y ALEXANDER (2016)
Hunga Tonga (2022)	Erupción volcánica submarina y tsunami.	Desplazamiento del lecho oceánico con fractura del único cable óptico submarino de interconexión.	Desconexión digital absoluta de la nación insular durante cinco semanas; ceguera humanitaria.	HELP.NGO (2024), HUGHES (2024)
Helene y Milton, EE. UU. (2024)	Huracanes mayores de categorías 4 y 5.	Destrucción simultánea de la red de media tensión, derribo de torres celulares y bloqueo vial.	Más de 100.000 personas incomunicadas; activación de emergencia de mensajería satelital directa.	ECC (2006), ORBYNEXA (2024)

Capítulo VI: Consideraciones de Ingeniería Estructural, Energética y Lógica para la Continuidad Operativa

La materialización de redes resilientes demanda integrar criterios rigurosos de ingeniería física, eléctrica y lógica bajo el marco de la iniciativa Reconstruir Mejor (*Build Back Better*) (BANCO MUNDIAL y UIT s.f., EVANS y MCGHIE 2011). En el ámbito estructural y geotécnico, las cimentaciones de las torres celulares deben proyectarse mediante estudios de mecánica de suelos que evalúen la amplificación sísmica local y el riesgo de licuación o desestabilización de taludes (CARTAYA et al. 2006, ANIH 2024). La integración de aisladores elastoméricos basales y amortiguadores dinámicos de fricción en la fijación de los gabinetes desacopla el equipamiento electrónico de las aceleraciones transmitidas por la losa o terreno de fundación (EVANS y MCGHIE 2011, CISA 2023). En zonas susceptible a inundaciones o deslizamientos, los recintos técnicos y salas de energía deben elevarse sobre pedestales de concreto estructural calculados por encima de la cota máxima histórica de agua para períodos de retorno de quinientos años (Tr = 500 años), dotando a todos los gabinetes exteriores de envolventes herméticas certificadas bajo norma IEC 60529 con grado IP67 (ITU-T 2020, CISA 2023). Asimismo, los pasos de cables y guías de onda hacia las casetas técnicas deben incorporar transiciones y fuelles flexibles capaces de admitir desplazamientos relativos diferenciales sin desgarrar los conductores (EVANS y MCGHIE 2011).

En el nivel lógico y de arquitectura de red, la resiliencia se alcanza transformando las radiobases en «Islas de Resiliencia» autónomas mediante el despliegue de computación en el borde

(*Multi-access Edge Computing* o MEC) y arquitecturas LACS (Sistemas de Comunicación de Área Local) (ALVES et al. 2020, NEIGLOBE NETWORKS 2024). Al interrumpirse el enlace troncal con el núcleo de red centralizado, la estación celular no suspende sus operaciones, sino que activa de forma automática una instancia virtualizada del plano de control en el servidor de borde local (ETSI 2015, NEIGLOBE NETWORKS 2024). Esta instancia procesa provisionalmente la autenticación de usuarios locales, permite el establecimiento de llamadas de voz sobre IP (VoIP) entre los terminales circunscritos al área de cobertura, habilita mensajería instantánea de socorro y distribuye servidores locales de cartografía táctica para la asignación de cuadrillas de auxilio sobre el terreno (WETTERWALD et al. 2016, NEIGLOBE NETWORKS 2024).

De forma complementaria, las Redes Auto-Organizadas (SON) dotadas de algoritmos de inteligencia artificial en el borde gestionan de forma óptima los recursos de radio y energía durante la contingencia (ALVES et al. 2020, NEIGLOBE NETWORKS 2024). Ante la pérdida de la acometida eléctrica comercial, el sistema ejecuta protocolos de degradación elegante: desactiva portadoras de alta frecuencia destinadas a tráfico comercial intensivo (como las bandas de 2,6 GHz o 3,5 GHz) y apaga módulos de transmisión de potencia elevada, concentrando la cobertura en bandas sub-GHz (700 u 850 MHz) que garantizan penetración en escombros y cobertura territorial amplia con un consumo eléctrico mínimo (ALVES et al. 2020, TERCERO LOZANO et al. 2024). Esta reconfiguración inteligente prolonga la autonomía operativa de los bancos de baterías de días a semanas, priorizando estrictamente las comunicaciones humanitarias y de rescate (ITU-T 2020, CISA 2023).

Capítulo VII: Validación Empírica de Tecnologías Tácticas y Redes No Terrestres

El desempeño de diversas soluciones tecnológicas avanzadas ha sido sometido a validación empírica en catástrofes recientes, confirmando su efectividad para sostener la continuidad operativa ante la destrucción de la infraestructura física tradicional (SAKANO et al. 2019, HELP.NGO 2024):

La conectividad directa satélite-celular (*Direct-to-Cell* o *Direct-to-Device* - D2D) representa uno de los hitos tecnológicos más relevantes en materia de resiliencia (ECC 2006, ESA 2020). Mediante cargas útiles avanzadas en satélites de órbita baja que emulan estaciones base convencionales, es posible establecer comunicación directa bidireccional con teléfonos celulares comerciales estándar sin exigir adaptaciones físicas ni periféricos especiales en los terminales de los usuarios (BASELGA et al. 2020, ESA 2020). Durante el azote de los huracanes Helene y Milton en 2024, esta solución tecnológica permitió el envío y recepción de más de 500.000 mensajes de emergencia y textos de geolocalización en comunidades de montaña y franjas costeras donde las torres celulares terrestres habían sido derribadas en su totalidad (ECC 2006, ORBYNEXA 2024).

Tabla 4. *Soluciones tácticas desplegables y arquitecturas de conectividad no terrestre validadas empíricamente en escenarios de contingencia extrema.*

Solución / Arquitectura Táctica	Base Tecnológica y Normativa	Métrica Operativa de Desempeño	Entorno de Validación en Desastres Reales	Referencia Técnica
Direct-to-Cell (D2D)	3GPP Releases 17/18 NTN; bandas de espectro celular comercial.	Conectividad SMS y paquetes de datos básicos; latencias inferiores a 50 ms.	Huracanes Helene y Milton (2024); >500.000 mensajes cursados.	ECC (2006), ESA (2020)
UAV con Backhaul LEO	Drones cautivos a 200 m acoplados a transceptores LEO.	Ancho de banda de 30 Mbps simétrico; radio de cobertura de 5 a 10 km.	Valles aislados por movimientos de remoción en masa y deslaves.	FIGARO et al. (2026)
Unidades Móviles MDRU	Estandarización bajo Recomendación ITU-T L.392 en módulos contenerizados.	Restablecimiento de red local autónoma en menos de 2 horas.	Terremoto de Japón (2011), Filipinas (2013) y Nepal (2015).	SAKANO et al. (2019)
Redes Mesh Smartphone	Protocolos ad-hoc multihop en frecuencias sub-GHz (ej. 900 MHz).	Enlaces salto a salto de cientos de metros con consumo insignificante.	Áreas con colapso total de infraestructura de mástiles y cableados.	ALVES et al. (2020)
Pasarelas en Banda C	Banda C extendida (4 a 8 GHz); teleportes reforzados sismorresistentes.	Disponibilidad de enlace >99,9% frente a absorción atmosférica por lluvia.	Nodos centrales ante tormentas tropicales y vaguadas.	SAMAD et al. (2021)

Las plataformas aéreas no tripuladas (UAV) integradas con enlaces satelitales LEO constituyen celdas móviles aerotransportadas de rápido despliegue (FIGARO et al. 2026). Drones cautivos o de vuelo estacionario posicionados a 200

metros de altitud, vinculados a terminales satelitales LEO en tierra, operan como repetidores móviles capaces de restaurar un ancho de banda simétrico de 30 Mbps en radios de hasta 10 km, posibilitando la reconexión de poblaciones aisladas por aludes y garantizando video aéreo continuo para la dirección de las brigadas de búsqueda (ANIH 2024, FIGARO et al. 2026)..

Las Unidades Móviles de TIC (MDRU), estandarizadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones bajo la Recomendación ITU-T L.392, proveen centros de conmutación y radiobases completas en contenedores compactos transportables por aire o vía terrestre ligera (ITU-T y NTT 2015, SAKANO et al. 2019). Estas unidades integran servidores de red virtualizados, bancos de baterías y transceptores de radiofrecuencia capaces de restaurar una celda celular plenamente funcional en menos de dos horas tras su arribo al área de desastre (SAKANO et al. 2019). Su eficacia fue validada tras el Gran Terremoto del Este de Japón en 2011, el tifón Haiyan en Filipinas en 2013 y el devastador sismo de Nepal en 2015, restableciendo la conectividad en núcleos urbanos y campamentos médicos en plazos mínimos (UIT s.f., SAKANO et al. 2019).

En el nivel comunitario, los protocolos ad-hoc de retransmisión por teléfono inteligente (Relay-by-Smartphone) transforman los dispositivos de los propios ciudadanos en nodos enrutadores de una red mallada (*mesh*) distribuida (ALVES et al. 2020, HELP.NGO 2024). Operando en frecuencias de uso libre o bandas sub-GHz (tales como 900 MHz), los mensajes de rescate se propagan salto a salto a través de los terminales de sobrevivientes y rescatistas hasta alcanzar una radiobase activa o un terminal satelital táctico, superando la interrupción de la red física intermedia (ALVES et al. 2020). Asimismo, para asegurar los enlaces de los teleportes y centros de comando ante fenómenos de lluvia extrema, el despliegue de pasarelas de respaldo en Banda C (4 a 8 GHz) asegura una disponibilidad superior al 99,9%, garantizando la troncalidad ante contingencias hidrometeorológicas severas (CHANG et al. 2013, SAMAD et al. 2021)

Capítulo VIII: Marco Normativo Internacional, Estándares de Diseño y Gobernanza

El aseguramiento de la resiliencia en telecomunicaciones no depende únicamente de la innovación en ingeniería de hardware y software, sino de la existencia de un marco de gobernanza institucional y acuerdos normativos internacionales previsibles (BANCO MUNDIAL y UIT s.f., CHANG et al. 2013). A nivel multilateral, el Convenio de Tampere sobre el Suministro de Recursos de Telecomunicaciones para la Mitigación de Catástrofes y las Operaciones de Socorro, adoptado en 1998, constituye el tratado vinculante que regula el despliegue expedito de auxilio técnico humanitario (UIT s.f.). El convenio exige a los Estados signatarios desmontar las trabas aduaneras y regulatorias en situaciones de emergencia mediante la exención total de aranceles de importación para equipos de telecomunicaciones satelitales y de radiofrecuencia, la asignación inmediata y gratuita de frecuencias del espectro radioeléctrico para operaciones tácticas de auxilio, y la concesión de inmunidades e inmunidad jurídica a los técnicos y operadores humanitarios internacionales desplegados en la zona afectada (UIT s.f., CHANG et al. 2013).

En el plano de las políticas públicas sectoriales, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y el Banco Mundial promueven la formulación obligatoria de los Planes Nacionales de Telecomunicaciones de Emergencia (NETP) estructurados en cuatro fases continuas (BANCO MUNDIAL y UIT s.f., UIT s.f.): La fase de mitigación establece el mapeo geográfico de riesgos sobre infraestructuras digitales críticas y exige redundancia física en troncales (BANCO MUNDIAL y UIT s.f.). La preparación define protocolos de interoperabilidad interinstitucional, ejercicios de simulación y el mantenimiento preventivo de unidades móviles de respuesta rápida (UIT s.f.). La respuesta involucra la activación inmediata de los canales prioritarios de seguridad pública y la conmutación a modos de contingencia (BANCO MUNDIAL y UIT s.f.). Finalmente, la fase de recuperación aplica las directrices de Reconstruir Mejor para sustituir infraestructuras destruidas por tecnologías avanzadas y sismorresistentes (BANCO MUNDIAL y UIT s.f., EVANS y MCGHIE 2011).

Este andamiaje institucional se articula con los estándares internacionales del consorcio 3GPP en sus Releases 17, 18 y 19, las cuales integran las Redes No Terrestres (NTN) dentro del estándar 5G y las futuras plataformas 6G (ALVES et al. 2020, BASELGA et al. 2020, TERCERO LOZANO et al. 2024). Gracias a esta homologación global, los teléfonos inteligentes comerciales pueden interactuar nativamente con satélites en órbita baja y capas aéreas sin modificaciones de hardware, unificando los mecanismos de señalización y seguridad (ECC 2006, COOMANS et al. 2024).

En el ámbito regulatorio nacional, este marco debe complementarse con la consagración vinculante del Roaming Nacional de Emergencia (BANCO MUNDIAL y UIT s.f., UIT s.f.). Esta figura legal obliga a todos los operadores móviles a permitir que, ante la caída de la red de un competidor en una zona de desastre, los usuarios de la operadora colapsada se autentiquen y cursen llamadas de auxilio y mensajes a través de las estaciones base supervivientes de cualquier otra empresa presente en el territorio de forma gratuita, anteponiendo la preservación de la vida a cualquier consideración comercial (BANCO MUNDIAL y UIT s.f.).

Capítulo IX: Conclusiones y Recomendaciones para la Ingeniería y el Hábitat

La condición de Venezuela como territorio expuesto a amenazas sísmicas e hidrometeorológicas severas, añadida a la concentración de su población en áreas de elevado riesgo geológico, demanda que las telecomunicaciones móviles sean clasificadas formalmente como una infraestructura crítica de soporte vital del hábitat construido (CARTAYA et al. 2006, ANIH 2024). La experiencia histórica nacional y la evidencia forense internacional ratifican que la interrupción del servicio celular agrava las consecuencias destructivas de un desastre, paralizando el mando institucional, entorpeciendo la evaluación técnica de daños y privando de auxilio a las víctimas en la ventana crítica de las Horas Doradas (SUÁREZ RUIZ y

PACHECO GIL 2008, PESCAROLI y ALEXANDER 2016, HELP.NGO 2024).

El paradigma clásico de diseño estructural debe evolucionar decididamente desde el principio restrictivo de Preservación de la Vida hacia la doctrina de la Recuperación Funcional (Functional Recovery) (EVANS y MCGHIE 2011, ALVES et al. 2020). Esta transición exige la incorporación formal del marco conceptual 3R (Confiabilidad, Robustez y Resiliencia) en los códigos normativos nacionales de edificación y telecomunicaciones, estableciendo exigencias técnicas de desempeño operacional continuo para todas las instalaciones nodales (ETSI 2015, ALVES et al. 2020).

Para materializar esta transformación en el territorio venezolano, se formulan las siguientes directrices técnicas y de políticas públicas:

En materia estructural y de emplazamiento físico, las normas técnicas de diseño sismorresistente deben exigir el aislamiento dinámico basal de bastidores electrónicos, el anclaje sismorresistente de componentes electromecánicos y la sobreelevación de recintos técnicos por encima de los niveles de inundación con período de retorno de quinientos años, incorporando envolventes estancas certificadas bajo norma IP67 (IEC 60529) y juntas de dilatación flexible en el paso de conductores (EVANS y MCGHIE 2011, CISA 2023).

En el ámbito de la ingeniería energética, debe proscribirse progresivamente el uso exclusivo de acumuladores de plomo-ácido en infraestructuras neurálgicas, promoviendo su reemplazo obligatorio por bancos de Litio-Ferrofosfato (LiFePO4) dotados de telemetría inteligente bajo la Recomendación ITU-T L.138 (ITU-T 2020, CISA 2023). Estas soluciones deben complementarse con el despliegue de Microrredes Híbridas de Energía Renovable (REHS) capaces de funcionar en modo isla, garantizando un horizonte mínimo de supervivencia energética ininterrumpida de diecisiete días sin dependencia de abastecimiento vial de combustibles hidrocarburos (CISA 2023).

En el plano de las arquitecturas lógicas y de radiofrecuencia, es imperativo promover topologías multicapa tridimensionales (3D RAN) que combinen la red terrestre convencional con enlaces troncales de conmutación automática sustentados en mega constelaciones satelitales en órbita baja (LEO), dotadas de enlaces ópticos intersatelitales (ALVES et al. 2020, GUPTA et al. 2024, STEVENS et al. 2024). Las estaciones base emplazadas en municipios vulnerables deben configurarse como «Islas de Resiliencia» mediante plataformas de computación en el borde (MEC), asegurando que, ante la ruptura del enlace con el núcleo central, la celda provea de forma local y autónoma autenticación provisional de abonados, voz sobre IP, georreferenciación de estructuras colapsadas y mensajería comunitaria (ETSI 2015, ANIH 2024, NEIGLOBE NETWORKS 2024).

En cuanto a las capacidades de respuesta táctica, se recomienda que las autoridades de protección civil y los operadores de telecomunicaciones coordinen la dotación estratégica y preposicionamiento de Unidades Móviles de TIC (MDRU) estandarizadas bajo la Recomendación ITU-T L.392, así como plataformas cautivas con drones acoplados a enlaces LEO, aptas para ser aerotransportadas y restablecer burbujas de conectividad celular en menos de dos horas sobre comunidades devastadas por aludes o sismos (UIT s.f., SAKANO et al. 2019, FIGARO et al. 2026).

Finalmente, en el terreno de la gobernanza institucional, el Estado debe actualizar el Plan Nacional de Telecomunicaciones de Emergencia (NETP), consagrar en la legislación de telecomunicaciones la obligatoriedad estricta del Roaming Nacional de Emergencia entre todos los operadores públicos y privados, y aplicar con carácter vinculante las disposiciones de diplomacia humanitaria establecidas en el Convenio de Tampere, removiendo aranceles aduaneros y agilizando la asignación de espectro táctico para la atención oportuna de emergencias (BANCO MUNDIAL y UIT s.f., UIT s.f., CHANG et al. 2013). La integración sinérgica entre el rigor de la ingeniería estructural, la innovación en arquitecturas digitales descentralizadas y una política pública orientada a la resiliencia constituirá la base indispensable para proteger la vida humana y asegurar la viabilidad del hábitat venezolano frente a las catástrofes socionaturales del porvenir (CARTAYA et al. 2006, ALVES et al. 2020, ANIH 2024).

REFERENCIAS

ABDALLA M. A. A. 2025. Satellite communication technologies for smart grid applications: A comprehensive review of GEO VSAT and LEO constellations. *International Journal of Science and Research Archive*, 17(2): 178-190.

ACADEMIA NACIONAL DE LA INGENIERÍA Y EL HÁBITAT (ANIH). 2024. Metodología para la evaluación rápida de daños en edificaciones y tecnologías emergentes en el hábitat. *Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat*, 61: 8-14.

ALIANZA REBELDE INVESTIGA. 2022. ¿Qué pasó en Las Tejerías? Experto en riesgos de la ULA lo explica. Caracas: *TalCual*.

ALVES H., N. H. MAHMOOD, O. L. A. LÓPEZ, S. SAMARAKOON, S. YRJÖLÄ, M. LATVA-AHO, M. JUNTTI y A. POUTTU (Eds.). 2020. *6G Resilience* (White Paper). Oulu: 6G Flagship, University of Oulu.

BANCO MUNDIAL y UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). s.f. Emergency communications module: National Emergency Telecommunications Plans (NETP). Digital Regulation Platform (DRP).

BASELGA O., A. CALVERAS y J. A. RUIZ-DE-AZUA. 2020. Exploring the performance of transparent 5G NTN architectures based on operational mega-constellations. Network, 5(3): 515.

CÁRITAS DE VENEZUELA. 2006. Comunicado oficial - Cáritas de Venezuela ante el doloroso impacto de los terremotos del 4 de junio de 2006. Caracas: Conferencia Episcopal Venezolana.

CARTAYA S., W. MÉNDEZ y H. PACHECO. 2006. Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. Interciencia, 31(9): 638-646.

CHANG K. C., M. J. KOZAR, C. E. ROSE, A. J. WEINERT, P. W. BREIMYER, R. DI CIACCIO, T. A. ROE, C. S. TIMMERMAN, M. A. SCHUMAN y D. D. MEHTA. 2013. A

review of satellite communications and complementary approaches to support distributed disaster response (Technical Report No. Group 4/64/65). Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory / U.S. Department of Homeland Security.

COOMANS W., H. HOLMA, J. WIGARD, M. LAURIDSEN y T. SPATHOPOULOS. 2024. *Satellite communication benchmarking with terrestrial 5G networks* (White Paper CID15031). Espoo: Nokia Bell Labs / Nokia Corporation.

CRUZ ROJA VENEZOLANA. 2022. *Flash Report N° 11 - Vaguada en altura y deslaves en Las Tejerías (Septiembre-Octubre 2022)*. Caracas: Gerencia de Operaciones.

CYBERSECURITY AND INFRASTRUCTURE SECURITY AGENCY (CISA). 2023. Resilient Power Best Practices for Critical Facilities and Sites. Washington D.C.: Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, Resilient Power Working Group.

ELECTRONIC COMMUNICATIONS COMMITTEE (ECC). 2006. Exploring the regulatory and technical elements with respect to national authorisation of satellite based Direct-to-Device (D2D) communications via existing available smartphones (ECC Report 373). European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT).

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). 2020. Converging Earth and space: Direct-to-Device connectivity via satellite (White Paper). Paris: European Space Agency.

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE (ETSI). 2015. Network Functions Virtualisation (NFV); Resiliency Requirements. Sophia Antipolis: Especificación de grupo ETSI GS NFV-REL 001 V1.1.1.

EVANS N. L. y C. MCGHIE. 2011. The performance of lifeline utilities following the 27th February 2010 Maule earthquake Chile. En: Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering: Building an Earthquake-Resilient Society, Paper No. 036: 1-8. New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE).

FIGARO M., F. ROSSATO, A. BONORA, M. GIORDANI, G. SCHEMBRA y M. ZORZI. 2026. Experimental evaluation of a UAV-mounted LEO satellite backhaul for emergency connectivity. En: *IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC 2026)*. IEEE.

GUPTA M., E. TUMANOVA, Z. BISCHOF, A. DAINOTTI y A. SAEED. 2024. Optimizing Low Earth Orbiting Satellite Networks for Disaster Scenarios. Atlanta: Georgia Institute of Technology.

HELP.NGO. 2024. Mission Profiles: Archive of global emergency response operations. UN Standby Partner.

HUGHES NETWORK SYSTEMS. 2024. *World Wi-Fi Day 2024: Connecting the unconnected and restoring lifelines in disaster zones*. Germantown: Hughes.

NEIGLOBE NETWORKS. 2024. AI connectivity when networks fail: Vicino AI portable infrastructure.

ORBYNEXA. 2024. *When the signal never dies: How Starlink is quietly rewiring rescue, research, and the open ocean*. Orbynexa Latest News.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD y CENTRO REGIONAL DE INFORMACIÓN SOBRE DESASTRES (OPS y CRID). 1997. El sismo de Cariaco del 9 de Julio de 1997 - Informe preliminar.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD y ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OPS y OMS). 2006. Terremotos en Venezuela (M7.3 y M7.5): Reporte de situación N° 3.

PESCAROLI G. y D. ALEXANDER. 2016. Critical infrastructure, panarchies and the vulnerability paths of cascading disasters. *Natural Hazards*, 82(1): 175-192.

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA. 2006. Decreto N° 5.364, mediante el cual se declara el Estado de Emergencia en todo el territorio nacional. *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela*, 7.039 Extraordinario.

SAKANO T., Y. SUZUKI, R. SASAZAWA, Y. KAWAMOTO, H. NISHIYAMA, N. KATO, A. YAMAMOTO y S. KOTABE. 2019. Development of Movable and Deployable ICT Resource Unit (MDRU) and its overseas activities. Journal of Disaster Research, 14: 363-374.

SAMAD M. A., F. D. DIBA y D.-Y. CHOI. 2021. A survey of rain fade models for Earth-Space telecommunication links—Taxonomy, methods, and comparative study. Remote Sensing, 13(10): 1965.

STEVENS A., B. IRADUKUNDA, B. BAILEY y R. DURAIRAJAN. 2024. Can LEO Satellites Enhance the Resilience of Internet to Multi-Hazard Risks? En: Passive and Active Measurement Conference (PAM 2024). Virtual: 170-195.

SUÁREZ RUIZ C. A. y H. A. PACHECO GIL. 2008. El desastre de Vargas de 1999: Interpretación geográfica y percepciones populares. Revista de Investigación, 63: 87-102.

TERCERO LOZANO P., S. EULER, D. SINGH y E. MEDEIROS. 2024. Non-Terrestrial Networks (NTN) for mission critical communications (White Paper). Ericsson.

UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (ITU-T). 2020. Recommendation ITU-T L.138: Smart energy solution for telecommunication rooms. Ginebra: UIT.

UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (ITU-T) y NTT TECHNICAL REVIEW. 2015. ICT standardization trends for disaster relief, network resilience, and recovery by ITU-T.

UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). s.f. *ITU Disaster Response: Rapid deployment of emergency telecommunications*. Ginebra: UIT.

WETTERWALD M., D. SAUCEZ, X.-N. NGUYEN y T. TURLETTI. 2016. SDN for Public Safety Networks (Research Report). Inria Sophia Antipolis / DIANA Research Team.