

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERU

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**ESTUDIO DE LA APLICABILIDAD DE REDES INALÁMBRICAS FORMADAS
POR VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS PARA DAR SOPORTE DE
COMUNICACIONES ANTE UN DESASTRE NATURAL**

**Trabajo de Investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA DE LAS TELECOMUNICACIONES**

AUTOR:

Alejandro Jesus Huamantuma Anco

ASESOR:

Dr. César Augusto Santiváñez Guarniz

Lima, Diciembre, 2020

Resumen

En el presente trabajo de investigación se estudia la aplicabilidad de redes inalámbricas formadas por vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) para dar soporte de comunicaciones en una situación de emergencia producto de un desastre natural.

Se comienza revisando el impacto de los desastres naturales en las infraestructuras de las telecomunicaciones y como la inhabilitación de los servicios de comunicaciones agrava los efectos negativos sobre la población afectada. Posteriormente se revisa que entre las soluciones de comunicaciones planteadas, las redes de rápido despliegue y, en especial, las redes Adhoc móviles (MANET, por sus siglas en inglés) aéreas presentan beneficios como reemplazos temporales de las infraestructuras inhabilitadas al actuar como redes de transporte aéreas adaptables a escenarios de desastre.

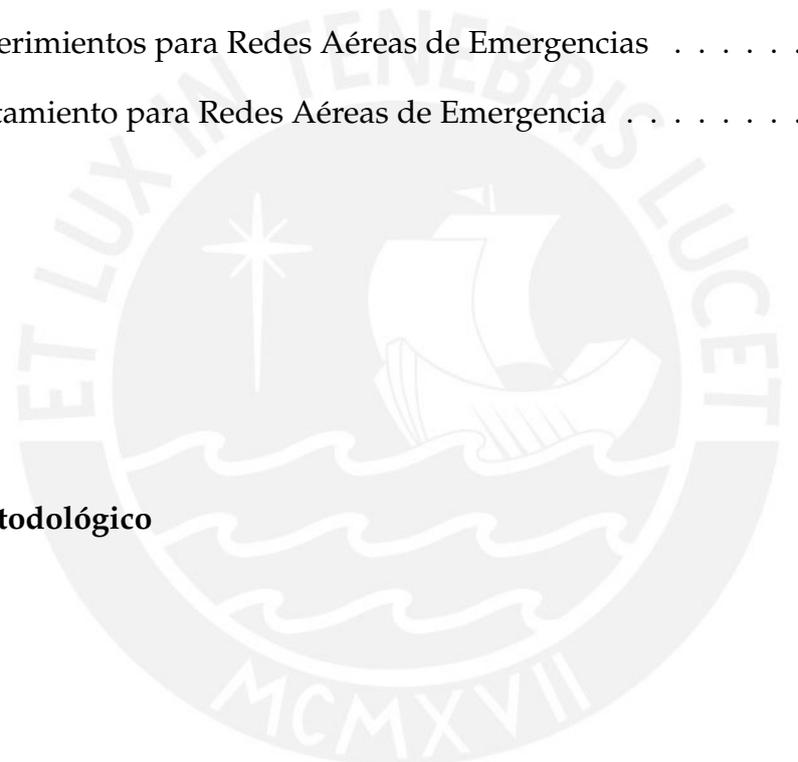
Se continúa el estudio revisando los requerimientos de comunicaciones presentes en una MANET aérea y los que se necesita satisfacer durante el desarrollo de una emergencia. Además, se revisan los retos en el despliegue de MANETs aéreas desde el punto de vista de su organización en el aire y de los mecanismos de enrutamiento. A partir de ahí se describen algunos de los protocolos de enrutamiento más típicos así como las nuevas propuestas de categorización y algunos de los nuevos protocolos planteados.

Finalmente, este trabajo realiza un estudio comparativo de la información encontrada y culmina con sugerencias para el diseño de redes aéreas para emergencias.

Índice general

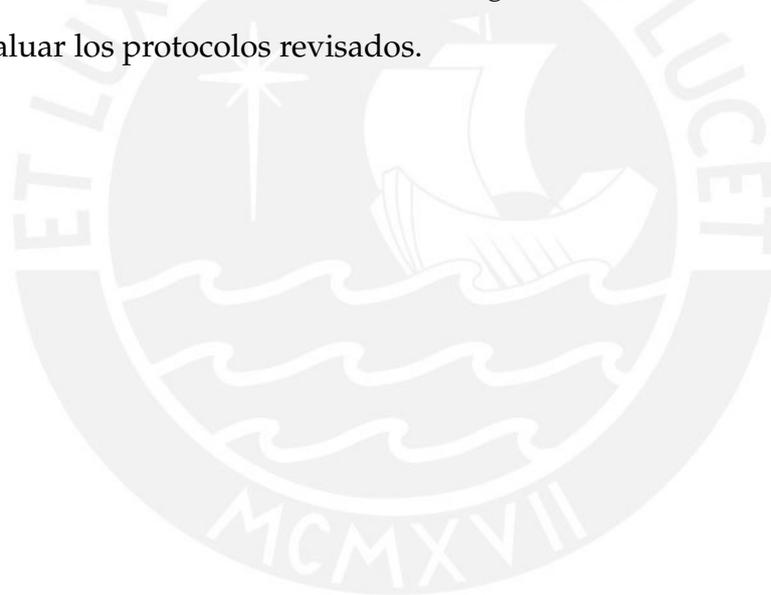
Resumen	II
Índice general	IV
Introducción	1
1 La Problemática de la Inestabilidad de las Telecomunicaciones Durante un Desastre Natural	2
1.1 Identificación del Problema	2
1.1.1 Las telecomunicaciones durante un desastre natural	3
1.1.2 Las telecomunicaciones en el plan de gestión de desastres	5
1.1.3 Investigaciones de la ITU Sobre Desastres	6
1.2 Objetivos de la Investigación	9
1.2.1 Objetivo general	10
1.2.2 Objetivos específicos	10
2 Redes Aéreas de UAVs Aplicadas a Situaciones de Emergencia	11
2.1 Requerimientos de Comunicaciones en una Emergencia	11
2.1.1 Requerimientos generales de una red de múltiples UAVs	14
2.1.2 Requerimientos específicos durante la emergencia	17
2.2 Retos Técnicos en el Despliegue	19
2.2.1 Arquitectura de la solución	20
2.2.2 Enrutamiento	25
2.3 Protocolos de Enrutamiento	30

2.3.1	Protocolos típicos	31
2.3.2	Protocolos nuevos	35
3	Estudio Comparativo Sobre Redes Aéreas para Emergencias	38
3.1	Comparación Entre Redes Terrestres y Redes Aéreas	38
3.2	Criterios de Comparación para el Enrutamiento de Redes Aéreas	42
3.3	Comparación de Protocolos Revisados	45
4	Sugerencias para el Diseño de Redes Aéreas de Emergencia	47
4.1	Requerimientos para Redes Aéreas de Emergencias	47
4.2	Enrutamiento para Redes Aéreas de Emergencia	48
	Conclusiones	51
	Bibliografía	58
	Anexos	I
	A Marco Metodológico	II



Introducción

La organización de este trabajo de investigación es la siguiente: En el Capítulo 1 se identifica el problema de la inhabilitación de los servicios de telecomunicaciones causados por un desastre natural, se revisa a las redes de rápido despliegue entre las que se resalta a las MANETs aéreas, se definen los objetivos y se describe el marco metodológico utilizado. En el Capítulo 2 se describen los retos técnicos en su despliegue, los requerimientos de comunicaciones y algunos de los protocolos de enrutamiento propuestos. Finalmente, en el capítulo 3, se presentan criterios de comparación para protocolos de enrutamiento basados en la bibliografía revisada, los cuales son utilizados para evaluar los protocolos revisados.



1. La Problemática de la Inestabilidad de las Telecomunicaciones Durante un Desastre Natural

En este capítulo se presentará a la inestabilidad de las comunicaciones durante un desastre natural como la problemática que es motivo del presente trabajo de investigación. Como se mencionará en las siguientes líneas, la inhabilitación de las infraestructuras de telecomunicaciones durante la emergencia contribuye a agravar los efectos negativos de los desastres naturales en la población afectada. Sin embargo, el diseño de redes especializadas para el soporte de comunicaciones surge como una de las soluciones más favorables para contrarrestar estos efectos negativos. En especial, las redes MANET formadas por UAVs son de interés para el presente trabajo de investigación como redes de rápido despliegue frente a una emergencia logrando recuperar parcial o totalmente la infraestructura inhabilitada.

1.1. Identificación del Problema

Los desastres naturales producen daños en la infraestructura de los sistemas de telecomunicaciones que causan en muchos casos la inhabilitación de los servicios que estos soportaban. Este hecho agrava aún más la situación de las personas afectadas pues impide que puedan comunicarse con el exterior con sus familiares o solicitar apoyo urgente de ser necesario. La caída de los servicios de telecomunicaciones en la zona afectada afectará el desempeño de los equipos de primera respuesta impidiéndoles coordinar sus acciones durante la emergencia. Además, esta falla puede durar muchos días y afectará todo el proceso de recuperación luego del desastre.

1.1.1. Las telecomunicaciones durante un desastre natural

Existen tres causas principales para las fallas de los servicios de telecomunicaciones en un desastre natural según [1]. El primero es la destrucción física de la infraestructura, cuya debilidad se debe a la falta de un alto grado de redundancia sobre todo asentada en las redes antiguas de telefonía fija. Se resalta que en muchos países en vías de desarrollo las nuevas tecnologías de conmutación de paquetes se han implementado sobre estas redes antiguas. El segundo es el daño a las infraestructuras de otros sistemas vinculados donde destaca los sistemas eléctricos que otorgan la energía necesaria para el funcionamiento de la red de comunicaciones. El tercero es el congestionamiento del tráfico de telecomunicaciones debido al sobre-uso de estas redes durante el desastre.

Como antecedente, entre los desastres ocurridos en la última década se pueden resaltar los siguientes por su afectación a los servicios de telecomunicaciones.

El terremoto de 7 grados ocurrido el 12 de enero del 2010 en Haití causó que el presidente no fuera capaz de comunicarse inicialmente con sus oficiales debido al derrumbe del Palacio Nacional. Las infraestructuras de comunicaciones y energía fueron seriamente dañadas afectando a la red de telefonía pública que entró fuera de servicio y a las redes celulares pues un 20 % de su infraestructura colapsó [2]. Un año después, en el terremoto y tsunami de Japón ocurrieron afectaciones similares a los sistemas de telecomunicaciones con el añadido de que las comunicaciones hacia el exterior del país fueron ralentizadas debido a los daños en los cables de fibra óptica submarina después del tsunami [3].

El caso del catastrófico terremoto de NEPAL en el 2015 es de interés particular para el Perú pues este país tiene similitudes con nuestra complicada geografía rural

andina y un sistema de telecomunicaciones limitado por la economía de la región. De acuerdo con la investigación de Adhikari [4], el acceso a las zonas alejadas mediante carreteras ya era muy complicado por la irregularidad del terreno en sus cordilleras que cubren un 83 % de todo el país, las cuales también solían causar bloqueos de señales celulares ocasionalmente. Además, las limitadas fuentes de energía eléctrica dificultaban el funcionamiento de dispositivos de comunicación. Durante la emergencia, estas condiciones previas se agravaron aún más con el daño a las pocas infraestructuras de telecomunicaciones existentes. Con un 82 % de la población viviendo en zonas rurales, el desastre ocasionó la muerte de más de 9100, dejó un saldo 25 mil heridos y cerca de 600 mil casas totalmente destruidas [1].

Sin embargo, existen oportunidades en el uso de las telecomunicaciones durante la emergencia de acuerdo con las necesidades de respuesta.

Por ejemplo, en el terremoto de Haití los mensajes de texto SMS fueron el medio elegido por la Federación internacional de la cruz roja para la búsqueda y rescate gracias a que es una de las primeras redes en restablecerse debido a la poca cantidad de recursos de red necesarios para su funcionamiento y a la característica de los teléfonos de guardar los mensajes y enviarlos cuando la red se vuelva a habilitar [5]. Durante el desastre de Nepal, se resalta el uso de los celulares como medio para acceder a la radio. Aunque el uso de este medio de comunicación no estaba muy extendido antes de la tragedia, se ha estudiado que cerca de un 64 % de la población tomó acción en base a la información recibida por este medio [1].

En base a estas experiencias, muchas organizaciones y países han visto la necesidad de crear planes de gestión de desastres que incluyan la utilización de redes de comunicaciones especializadas por cada tipo de escenario y con diferentes propósitos. Uno de los resultados de la ITU es explorado en la siguiente sección.

1.1.2. Las telecomunicaciones en el plan de gestión de desastres

Las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) son aplicables como herramienta para hacerle frente a las situaciones de emergencia debido a que permiten acortar los tiempos de respuesta de las diferentes acciones desplegadas manteniendo coordinados a los equipos involucrados y proporcionando información oportuna a los afectados. Con la información a tiempo es posible determinar planes de acción focalizando la ayuda con el fin de disminuir lo mejor posible el daño a la población. En consecuencia, la inclusión de las TICs en el plan de gestión de desastres se vuelve una necesidad muy importante y viene siendo incluida por muchos gobiernos e investigada por universidades y organizaciones internacionales.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) ha impulsado, dentro de su organización, la investigación en el uso de las TICs durante situaciones de emergencia. Uno de sus últimos resultados publicados es una guía para el planeamiento del uso de las TICs en emergencias llamado "*Guidelines for national emergency telecommunication plans*" (2019) [6]. Este documento sugiere elaborar cuatro fases en la gestión de desastres tomando como insumo la evaluación de los riesgos en el sector de las telecomunicaciones a lo largo de todo el territorio deseado.

Las fases de la gestión de desastres según la ITU son:

1. Mitigación: Las acciones para prevenir una emergencia.
2. Preparación: El planeamiento de respuesta a una emergencia.
3. Respuesta: La ejecución de los planes implementados en la fase de preparación.
4. Recuperación: Las acciones para proveer ayuda a la zona afectada hasta que se vuelva al estado previo a la emergencia.

En la fase de mitigación, las TICs deben ser utilizadas para facilitar la implementación de estrategias, tecnologías y procesos que reduzcan muertes y daños en desastres potenciales. Específicamente se pueden utilizar estas herramientas para conectar los sistemas de monitoreo y alerta temprana, y para difundir información preventiva a la población. En la fase de preparación se debe evaluar, identificar y mejorar el estado de los sistemas de comunicaciones debido a que las TICs serán claves para la coordinación entre todos los involucrados en la gestión de desastres durante la fase de respuesta. Además, se deben preparar los planes de contingencia que soporten todas las acciones de respuesta asegurando la recuperación de las comunicaciones. En la fase de respuesta las TICs son utilizadas para asegurar la interoperabilidad y continuidad de las comunicaciones, las cuales son vitales para la ejecución de acciones oportunas protegiendo la vida de las personas. Por ejemplo, las redes de comunicaciones apoyarán en las actividades de búsqueda y rescate o les permitirán a los sobrevivientes localizar a sus familiares perdidos durante la emergencia. En la fase de recuperación, la ITU sugiere que las autoridades analicen las fallas ocurridas durante el desastre a fin de reconstruir sistemas de comunicación más resilientes y con tecnologías más eficientes [6].

1.1.3. Investigaciones de la ITU Sobre Desastres

La ITU fomenta la investigación de nuevas tecnologías en servicios de telecomunicaciones a través de distintos grupos de estudio que generan recomendaciones en distintas áreas. El grupo de estudio número dos (SG2, por sus siglas en inglés) tiene encargado entre sus objetivos las investigaciones en gestión de desastres. En el año 2013, el SG2 creó el "Grupo de Investigación sobre sistemas de emergencia en casos de desastre, resiliencia de red y recuperación" con el objetivo de sentar las bases para sus investigaciones futuras en este campo.

El grupo concluyó en el año 2014 publicando ocho reportes cuyos resultados más relevantes para la presente tesis son las investigaciones en la respuesta de los sistemas de comunicaciones frente a desastres ocurridos, tecnologías prometedoras con sus casos de uso y requerimientos para las redes de comunicaciones que sean aplicadas antes, durante y después del desastre. A continuación, comentaré brevemente los resultados de estos reportes debido a su importancia como antecedentes de investigación.

En [3], el grupo de investigación presenta como casos de estudio cinco desastres naturales ocurridos hasta el 2011 donde identifican el impacto causado a los servicios de telecomunicaciones y resaltan las causas principales. Las conclusiones de dicho reporte tienen similitud con los obtenidos por la investigación en [1] llevada a cabo en el 2019 con los desastres de la última década y comentada en la sección 1.1.1. El hecho de que en los desastres recientes se presenten causas similares a las evaluadas por la ITU ejemplifica la importancia de seguir realizando e implementando planes de gestión de desastres con las telecomunicaciones como herramienta imprescindible.

Los reportes [7] y [8] describen diversas tecnologías prometedoras para ser incluidas en una infraestructura orientada a la gestión de desastres. En [7] se describen esas tecnologías como parte de una sola vista integrada donde las redes son categorizadas en red Core, red de acceso y red de usuario.

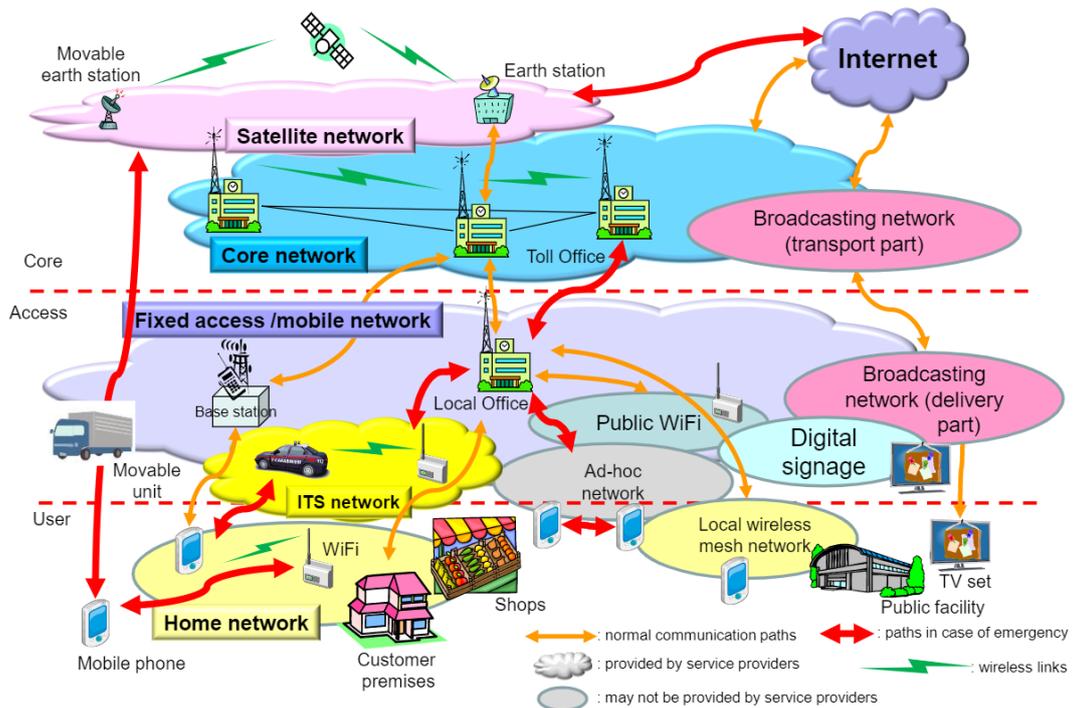


Figura 1.1: Vista integrada de redes para el soporte de emergencias

Tomado de [7].

En la Figura 1.1 se presenta esta vista integrada donde también se identifican los caminos regulares que sigue la información y los caminos que se utilizan en situaciones de emergencia. Los satélites de telecomunicaciones que orbitan la tierra no son afectados por los desastres en la superficie, la instalación de estaciones satelitales temporales es una solución para recobrar la conectividad en zonas donde la infraestructura de Core haya quedado inoperativa [7].

En la red de acceso, las infraestructuras de las líneas de acceso fijas son afectadas fácilmente por un desastre natural y las infraestructuras de redes móviles son sobrecargadas con solicitudes de comunicación producto del temor en la población durante un desastre. Nuevas tecnologías se han propuesto para suplir el acceso a las redes de telecomunicaciones. Las unidades móviles pueden transportar equipos

de comunicación celular para emergencias y enlazar directamente con las estaciones de recepción satelitales. Los sistemas de transporte inteligentes utilizan enlaces Ad Hoc entre vehículos terrestres para formar redes de acceso durante el desastre. De la misma manera los enlaces AD Hoc también pueden ser implementados en equipos aéreos formando redes multi salto con la característica de que pueden sobrepasar el inconveniente del transporte hacia la zona afectada [7].

En la red de usuario, equipos inalámbricos como celulares, laptops o puntos de acceso domésticos pueden ser utilizados para formar redes mesh que permitan extender la cobertura de señales WiFi. Los medios de comunicación como TV, radio o paneles publicitarios así como los equipos celulares pueden ser utilizados para transmitir señales de alarma previo a un desastre gracias a los sistemas de alerta temprana [7].

1.2. Objetivos de la Investigación

El presente trabajo de investigación se enfoca en la aplicación de redes de emergencia para la etapa de respuesta en la gestión de desastres. Como se observó en los antecedentes de la sección 1.1.1, existen oportunidades en el uso de las telecomunicaciones para disminuir los efectos de un desastre. En especial, el uso de los celulares por los afectados durante la emergencia puede ayudar enormemente en la disminución de los daños. En ese sentido, devolver el acceso a internet rápidamente a estos equipos celulares debería ser uno de los puntos centrales en la fase de preparación.

Diferentes propuestas podrían ser aplicables como redes de transporte para emergencias. Sin embargo, si se considera la accidentada geografía de nuestro país podemos percatarnos que la ayuda terrestre sería prácticamente inviable en las primeras horas. Frente a este inconveniente, el uso de redes aéreas podría tener mejores resulta-

dos evitando problemas de acceso y permitiendo dar cobertura aérea de emergencia a las zonas afectadas.

Esta investigación considera el diseño de redes aéreas formadas por UAVs para dar soporte de comunicaciones en una emergencia como el problema principal de investigación. Este trabajo estudia los retos en el despliegue y los requerimientos de comunicaciones de la red en una situación de emergencia. Además, el enrutamiento en estas redes aéreas se estudia con detalle por ser un punto crítico en el funcionamiento de la red para transportar el tráfico de los afectados.

1.2.1. Objetivo general

Determinar las consideraciones técnicas de comunicaciones que requiere el diseño de una red aérea formada por UAVs y sus respectivos protocolos de enrutamiento para dar soporte de comunicaciones en situaciones de emergencia.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Identificar los requerimientos técnicos de comunicaciones de una red que da soporte de comunicaciones durante una situación de emergencia.
2. Estudiar los retos técnicos de comunicaciones que presenta el despliegue de una red aérea de UAVs.
3. Estudiar los protocolos de enrutamiento aplicables a una red aérea de UAVs.

2. Redes Aéreas de UAVs Aplicadas a Situaciones de Emergencia

Es necesario tener claro cuáles son los requerimientos de comunicaciones que tiene que optimizar la red a fin de satisfacer las necesidades identificadas. Además, la aplicación de redes aéreas formadas por UAVs como soporte de comunicaciones en una situación de emergencia implica considerar nuevos retos técnicos relacionados su arquitectura y a los mecanismos de enrutamiento. En este capítulo se estudiará los requerimientos, los retos y en especial los protocolos de enrutamiento que se han propuesto.

2.1. Requerimientos de Comunicaciones en una Emergencia

En [9], [10] y [11], el grupo de investigación "*Focus Group on Disaster Relief Systems, Network Resilience and Recovery*" de la ITU identifica los requerimientos que deben considerar las redes de comunicaciones que forman parte de la gestión de desastres en tres etapas.

En la figura 2.1 se aprecia como la cantidad de recursos disponibles depende de las etapas del desastre. Antes de un desastre, las infraestructuras de redes deben prepararse implementando redundancia. Durante el desastre, las redes implementadas deben resistir los daños lo suficiente para poder aplicar políticas de control de congestión con los recursos restantes. En ese punto se pueden desplegar recursos complementarios que sustituyen en parte la infraestructura perdida. Finalmente se debe recuperar progresivamente la infraestructura dañada reparando o instalando nuevos equipos [10].

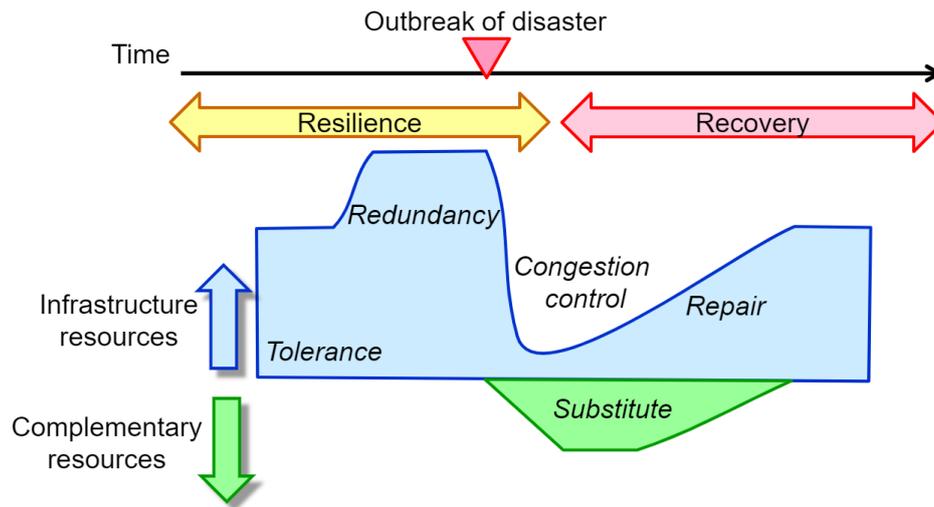


Figura 2.1: Relación entre las fases de un desastre y los recursos de infraestructura de telecomunicaciones

Tomado de [10].

El rápido despliegue de redes como una de las primeras medidas de respuesta justo después de un desastre natural permite recuperar la conectividad y proveer asistencia a las personas afectadas y/o equipos de primera respuesta desplegados. Este tipo de soluciones necesita ser adaptable a diferentes escenarios y ser desplegada en el menor tiempo posible.

Los requerimientos mínimos que debe satisfacer una red de rápido despliegue son identificados en [12]:

- Resiliencia: La red debe proveer y mantener servicios esenciales en condiciones adversas.
- Servicios básicos: Los equipos de primera respuesta pueden necesitar compartir información actualizada de sus posiciones, mapas, imágenes y otros tipos de datos locales para poder coordinar sus operaciones.

- Automatización: Características como autoorganización, auto optimización y auto reparación reducen la necesidad de intervención humana y mejoran su confiabilidad.
- Movilidad: Los nodos de la red deben poder ser desplegados más de una vez en diferentes escenarios para adecuarse al ambiente y optimizar su funcionamiento.
- Interoperabilidad: Las redes deben ser compatibles con otros sistemas de comunicaciones no afectados con el fin de extender el área de cobertura y los servicios ofrecidos.

Una red aérea de rápido despliegue puede tener diversas configuraciones para dar soporte de acuerdo con la aplicación específica durante la emergencia. Por ejemplo, los UAVs pueden formar una red multisalto semi-estática con el objetivo de dar cobertura Wifi de emergencia para la población afectada o pueden formar una red multisalto móvil equipada con diversos sensores que acompañe a los equipos de búsqueda y rescate ayudándolos a encontrar heridos en la zona afectada.

Estas aplicaciones demandan requerimientos específicos de comunicaciones en las redes aéreas para soportar sus necesidades de transmisión. Este tráfico de comunicaciones puede ser relacionado a la data de la aplicación, la data generada por la red para mantener sus características de auto configuración o la data necesaria para mantener el control de los UAVs en el aire. En las siguientes secciones se estudian los requerimientos generales de una red aérea de UAVs (sección 2.1.1) y los requerimientos específicos que tendría en una situación de emergencia (sección 2.1.2).

2.1.1. Requerimientos generales de una red de múltiples UAVs

En [13] los autores estudian y proponen los requerimientos de comunicaciones para redes aéreas del punto de vista de la gestión de la red y de las aplicaciones de esta. En primer lugar, los requerimientos de comunicación para la gestión de la autonomía de la red son analizados para la autonomía de los nodos y la autonomía de la misión. En segundo lugar, los autores analizan los requerimientos de comunicación en aplicaciones de manera cualitativa y cuantitativa.

2.1.1.1. *Requerimientos para la gestión de la red*

Los UAVs necesitan comunicarse para controlar sus movimientos. Por ende, la cantidad de tráfico necesaria depende del nivel de autonomía que tengan los UAVs. En ese sentido, los autores de [13] proponen la siguiente clasificación:

- Tráfico de control: Sin autonomía, el operador en tierra controla el UAV.
- Tráfico de coordinación: Entidad central coordina las ubicaciones de los nodos de toda la red.
- Tráfico de medición: La siguiente ubicación es decidida por el nodo mismo durante el vuelo midiendo su entorno.

En el caso especial del tráfico de coordinación, se puede tener dos tipos de soluciones, central (solución simple y sincronizada) o distribuida (compleja pero evita que la entidad sea el único punto de falla) para la toma de decisiones. El tráfico requerido depende del proceso de cada decisión. De igual manera, los autores de [13] proponen la siguiente clasificación:

- Tráfico de telemetría: Posicionamiento.
- Tráfico de coordinación: Entre los nodos.
- Tráfico de medición: Medición del ambiente físico.

2.1.1.2. *Requerimientos para el soporte de aplicaciones*

Hayat en [13] clasifica estos requerimientos en dos grupos, cualitativos y cuantitativos. En el primer caso, se resaltan las siguientes cuatro categorías generales:

- Conectividad:

Se subdivide en conectividad con la entidad de toma de decisiones (coordinación y monitoreo de la red), con personal en tierra (cobertura inalámbrica aérea) y entre UAVs (depende de la aplicación específica).

- Demanda de tráfico:

Se relaciona con el transporte de la data medida por los sensores (Control y coordinación de la misión) y el transporte de información de acuerdo con la aplicación. Esta información puede clasificarse por su funcionalidad (telemetría, coordinación y data medida) y el tiempo de transmisión requerido (tiempo real, periódico o tolerante a retrasos).

- Infraestructura:

Se refiere al provisionamiento de redes de comunicaciones áreas (*mobile backhaul*). Los UAVs puede ser estaciones base que extiendan o reemplacen los servicios de un lugar.

- Adaptabilidad:

Se subdivide en adaptabilidad de red (Movilidad de los nodos, cambios en el terreno, variabilidad de la calidad de los enlaces y nodos entrando y saliendo de la red) y adaptabilidad de la misión (Los objetivos de la misión pueden cambiar las tareas para cada UAV).

En el segundo caso, los requerimientos cuantitativos analizados se dividen en tres categorías principales:

- Requerimientos de misión:

Incluye la información de que datos necesito transmitir (obligatoriamente: control, coordinación y medición. Variable: data de la aplicación), que tan seguido necesito intercambiar la información entre nodos (Influye para determinar los requerimientos de ancho de banda de la red) y cuáles son los requerimientos específicos de la misión (área de cobertura mínima, máximo retraso, entre otros).

- Requerimientos de sistema:

Se subdivide en requerimientos de implementación (enlace directo a central en tierra o enlaces Adhoc entre los nodos antes de conectar con la central en tierra) y número de nodos (Depende del tamaño del área de despliegue, los tipos de UAVs y el “transceiver” utilizado).

- Requerimientos de red:

Se subdivide en throughput (capacidad efectiva de transmisión de datos entre los enlaces de la red), tipo de tráfico (tiempo real, periódico, tolerante a retrasos, confiabilidad, etc.) y latencia (retraso de un paquete durante la transmisión a través de la red).

Adicionalmente, los requerimientos de Total Overhead y Escalabilidad para protocolos de enrutamiento de redes Ad Hoc son definidos y evaluados en [14].

1. Total Overhead:

Se define como la cantidad total de ancho de banda utilizada que excede a la cantidad mínima de ancho de banda requerida para reenviar paquetes en la distancia más corta (saltos) suponiendo que los nodos tengan la información de la topología completa. Además del "Overhead" causado por los paquetes de control, aquí se considera el efecto del uso de rutas no optimas al cual se le denomina "Suboptimal Overhead" .

2. Escalabilidad:

Se define en general como la habilidad de una red para soportar el incremento de sus parámetros limitantes (tasa de movilidad, tasa de tráfico, tamaño de la red, etc.). Se evalúa el efecto de cada parámetro obteniendo un factor que relaciona la variación en la capacidad de transmisión de la red y el incremento de el parámetro de evaluación. En ese sentido, la escalabilidad de un protocolo de enrutamiento se define como la habilidad para soportar el continuo incremento de los parámetros de red sin degradar el rendimiento de esta.

En la siguiente sección se revisarán las aplicaciones principales de una red aérea de UAVs y se identificarán los requerimientos de comunicaciones más relevantes por cada uno.

2.1.2. Requerimientos específicos durante la emergencia

En [15], los autores estudian las posibilidades para la utilización de los UAVs como parte de la gestión de desastres. Se agrupan a las diversas posibilidades en seis

grupos y se analizan los requerimientos en cada uno. En resumen, la información discutida por cada grupo es la siguiente:

- Monitoreo, pronóstico y sistemas de alerta temprana:

Se desarrollan durante la fase de prevención del desastre y buscan predecir la ocurrencia de desastres y/o sus efectos en la población. En este caso, se busca garantizar la confiabilidad de la red minimizando los errores en la transmisión debido a que se tienen que transportar grandes cantidades de datos de diferentes sensores. En ese sentido, también es importante considerar la minimización del consumo de energía en los UAVs. Adicionalmente, los sistemas de alerta temprana necesitan avisar a la población rápidamente ante el pronóstico de un desastre y en ocasiones se puede utilizar a los UAVs para dar el aviso en zonas alejadas. En estos casos es importante considerar además la minimización de la latencia.

- Fusión de información sobre desastres:

Su impacto más importante se observa durante el desastre. El objetivo de estas aplicaciones es combinar diferentes fuentes de información disponible y/o crear un puente entre las diferentes tecnologías que se estén utilizando. En este caso se necesita de garantizar la confiabilidad de la transmisión como en el caso anterior y sincronizar los equipos de diferentes tecnologías.

- Conciencia situacional y logística:

El objetivo de estas aplicaciones es obtener información durante la emergencia, especialmente respecto al movimiento de las personas en peligro por el desastre y de los equipos de rescate desplegados en la zona afectada.

- Evaluación de daños:

El objetivo de estas aplicaciones es tener un panorama completo de la afectación del desastre. La confiabilidad de la red es especialmente crítica debido a que la data recopilada se utiliza para la toma de decisiones durante el desastre como la distribución de los equipos de rescate.

- Sistemas de comunicación independientes:

El objetivo de estas aplicaciones es restablecer la infraestructura dañada por el desastre. Los UAVs pueden formar redes de rápido despliegue volviendo a conectar a las personas afectadas. En la mayoría de los casos se desea incrementar la cobertura de la red y reducir la latencia en las comunicaciones de emergencia a través de las cuales es posible pedir ayuda o apoyar en las labores de los rescatistas.

- Misiones de búsqueda y rescate:

El objetivo de estas aplicaciones es proveer de soporte aéreo a los rescatistas. Las redes de UAVs se movilizan en la zona afectada para apoyar en la búsqueda mediante sus cámaras o usando sensores para detectar sobrevivientes. En estos casos se incrementa aún más la dinamicidad de la topología debido al movimiento de los nodos. Las redes deberían optimizar la confiabilidad y adaptabilidad minimizando el gasto de energía por el continuo movimiento de los nodos.

2.2. Retos Técnicos en el Despliegue

Las posibles aplicaciones de las redes MANET formadas por UAVs son muchas. Sin embargo, todas ellas tienen que sobrellevar los nuevos retos que presenta su diseño e implementación. En especial, los retos de comunicaciones vienen de considerar la arquitectura de la solución y los mecanismos de enrutamiento de la red.

2.2.1. Arquitectura de la solución

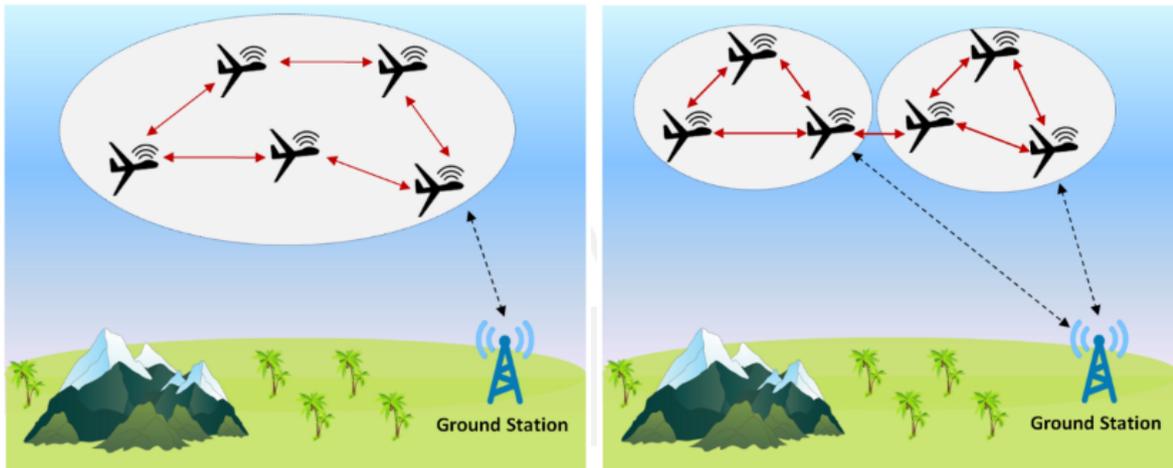
Debido a la versatilidad de las redes Ad Hoc áreas, la arquitectura u organización de la red puede tomar diferentes formas y/o incluir otros elementos además de los mismos UAVs. En [16] se agrupa las arquitecturas de redes de UAVs en soluciones jerárquicas y por nivel de coordinación y cooperación entre los nodos. Además, en [17] se agrupan las de redes de UAVs de acuerdo con su aplicación. Estas posibilidades son explotadas en diferentes aplicaciones agrupadas de acuerdo con su propósito en [13], [18]. En especial, aplicaciones de UAVs para la gestión de desastres son estudiadas en [15] considerando diferentes configuraciones para la red.

2.2.1.1. Soluciones jerárquicas

Los autores de [16] resaltan el beneficio de las redes formadas por múltiples UAVs para evitar el enlace directo con la estación controladora en tierra que representa un punto débil de la comunicación. Solo algunos nodos tendrían el enlace a tierra mientras que los demás se comunicarían a través de la red multi-salto. Sin embargo, diferentes requerimientos deben tenerse en cuenta para su despliegue como se comentó previamente. Las clasificaciones propuestas en [16] hacen frente a algunos de estos factores minimizando su impacto o evitándolos.

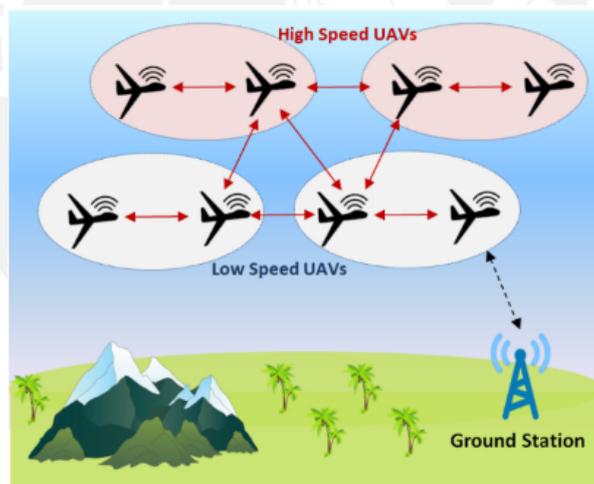
- Single-layer and single-group: (Figura 2.2a). Tiene una topología sin jerarquías de un solo grupo y un solo UAV. Se sugiere para grupos pequeños con un solo propósito como vigilancia area.
- Single-layer and multi-group: (Figura 2.2b). Tiene una topología sin jerarquías pero dividida en diferentes grupos para facilitar la gestión de toda la red y disminuir el uso del ancho de banda.

- *Multi-layer and multi-group*: (Figura 2.2c). Tiene una topología con jerarquías y dividido en grupos. Se sugiere para escenarios con diferentes tipos de UAVs. De esta manera se puede agrupar por características similares y aprovechar estas diferencias.



(a) Single-Layer and Single-Group

(b) Single-Layer and Multi-Group



(c) Multi-Layer and Multi-Group

Figura 2.2: Arquitecturas de comunicaciones para MANETs aéreas

Tomado de [16].

2.2.1.2. Soluciones por nivel de coordinación y cooperación

Shumeye en [16] comenta que existen dos factores necesarios para que se hagan efectivos los beneficios que traen las redes formadas por múltiple UAVs: La coordinación (sincronización temporal entre los nodos) y la cooperación (colaboración para conseguir un mismo objetivo). Según el nivel presente de ambos factores, las agrupaciones son:

- Physically-Linked: (Figura 2.3a). Requiere una alta cooperación para llevar a cabo una misma tarea física, usualmente de transporte. El movimiento de un nodo depende de otro.
- Mission Dependent Formation: (Figura 2.3b). Requiere una alta coordinación y cooperación entre nodos. Usados en misiones de exploración o búsqueda y rescate. Suele incluir roles de líder en el grupo para el control de toda la operación.
- Labor Division: (Figura 2.3c). Requiere una baja coordinación y cooperación entre nodos. Cada UAV está encargado de una tarea en específico pero colaboran para un objetivo global.
- Swarm Cooperation: (Figura 2.3d). Requiere una alta coordinación. Todos los nodos realizan tareas en las que repiten la misma actividad sobre una zona geográfica.

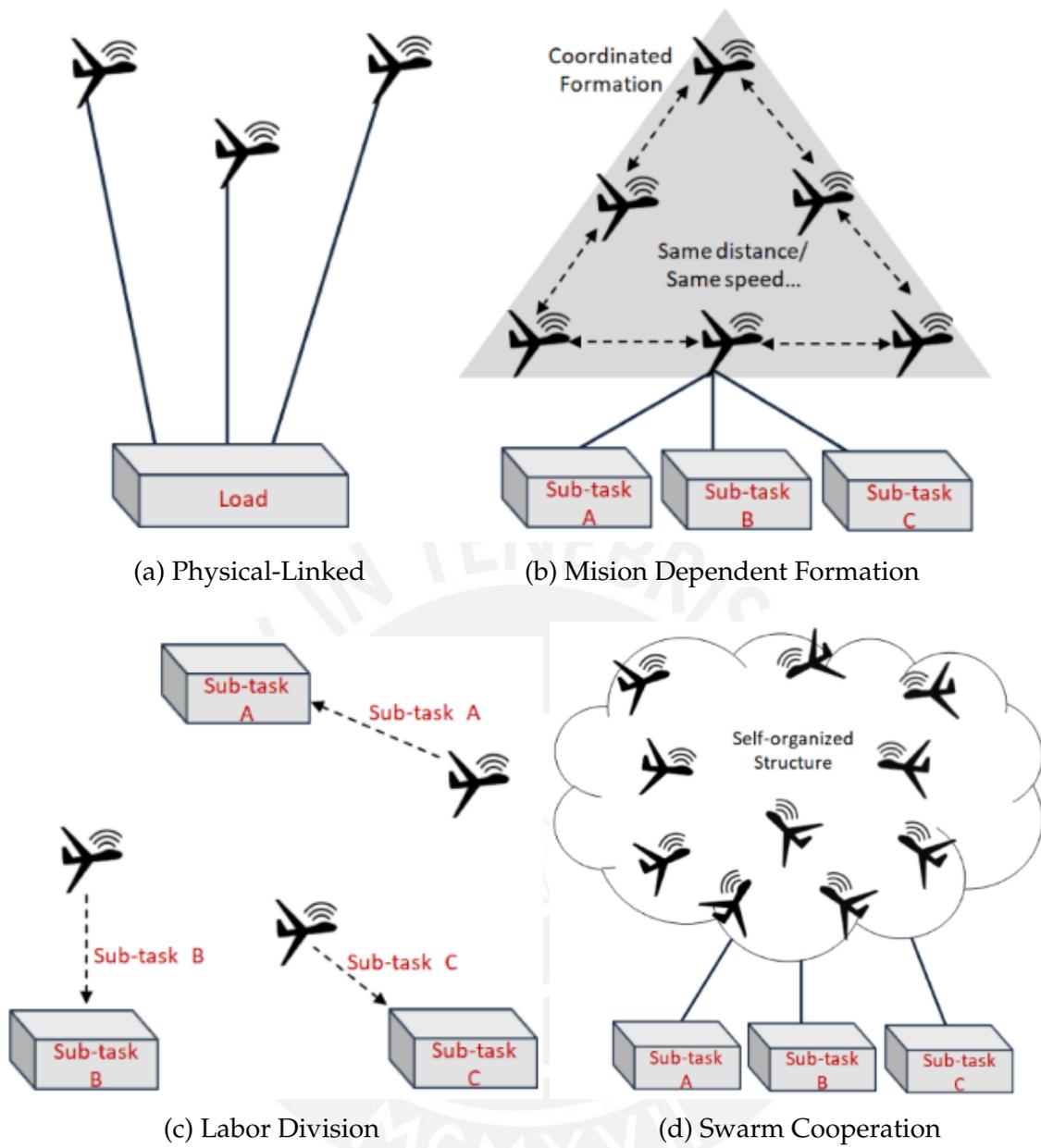


Figura 2.3: Arquitecturas de organización para MANETs aéreas

Tomado de [16].

2.2.1.3. Soluciones por aplicación

En [17] se agrupan las de redes de UAVs de acuerdo con su aplicación en tres categorías: Internet Delivery (Infraestructura inalámbrica para dar cobertura de red), Sensing (Monitoreo área) y Attack (Aplicaciones militares). En la tabla 2.1 se diferencias las características para estas tres categorías.

Tabla 2.1: Arquitectura por aplicación para MANET aéreas

Característica	Internet Delivery	Sensing	Attack
Posición de los UAVs	Fija	Cambio suave y coordinado	Cambio frecuente
Conexión de red	Con enlace a tierra, como estación base aérea	Con enlace a tierra	Con o sin enlace a tierra.
Control	Centralizado (basado en posición)	Centralizado (basado en tareas)	Distribuido (basado en tareas).
UAV como cliente o servidor	Servidor (Enrutamiento)	Servidor (Cuando reciben de sensores), Cliente (Cuando cargan sensores)	Servidor (distribuyendo información), Cliente (en ataque)
Probabilidad de pérdida de paquetes	Baja	Media	Alta
Comunicación U=UAV, C=Cliente, I=Infraestructura	U2U, U2I, C2U	U2U (retransmisión utilizando buffers), U2I, U2C	U2I (comandos), U2U

Nota. Datos de [17]. Elaboración propia.

Debido las múltiples posibilidades para una arquitectura de redes Ad Hoc aéreas, surgen nuevos retos en la gestión y transporte de la información para optimizar los recursos de la red. Los protocolos de enrutamiento utilizados en redes Ad Hoc terrestres son insuficientes. En consecuencia, nuevas técnicas de enrutamiento han venido siendo investigadas en la última década. El creciente interés ha llevado a nuevas e innovadoras propuestas divididas en diferentes categorías. En la siguiente sección se estudiará las diferentes propuestas para hacer frente al reto del enrutamiento en las MANET aéreas.

2.2.2. Enrutamiento

Los protocolos de enrutamiento para MANET aéreas deben considerar el área de aplicación de la red, el tráfico de datos que se desea transmitir y los requerimientos de calidad de servicio. Además, la dinamicidad de la topología (variabilidad de los enlaces, movilidad de los nodos y cambios en la topología) es otro factor imprescindible para tomar en cuenta en el diseño de protocolos [16].

2.2.2.1. Técnicas de enrutamiento

En [19] los autores presentan y describen 12 técnicas de enrutamiento muy utilizadas para redes MANET aéreas.

- Store-Carry and Forward (SCF): Ante fallas en la conectividad, los nodos guardan la data hasta que encuentran un siguiente nodo para continuar la transmisión. Aumenta el retraso de la transmisión.
- Greedy Forwarding (GF): Los nodos retransmiten el paquete al nodo más cercano geográficamente al destino. Puede fallar en la optimización de la ruta inicial-

mente pero se puede combinar con otras técnicas para tomar en cuenta otros factores al momento de elegir.

- Prediction (PR): Los nodos estiman las posiciones futuras de sus vecinos en movimiento para elegir a cuál transmitir, usualmente el más cercano al destino. Requiere que se comparta adicionalmente la información de velocidad y dirección de cada nodo en la red.
- Discovery Process (DP): Un nodo que desea transmitir disemina paquetes RREQ (“Route Request”) en toda la red para encontrar todos los posibles caminos hacia su destino y decidir el mejor. Puede causar congestión en la red y consumo excesivo de ancho de banda.
- Clustering (CL): Los nodos se dividen en zonas (“clusters”) con un líder (“cluster-head”). La comunicación entre zonas es a través de los nodos líderes. Se simplifica la gestión en cada zona al disminuir el número de nodos pero puede empeorar el rendimiento de la red sino se agrupan correctamente de acuerdo con el escenario.
- Link State (LST): Los nodos diseminan la información de sus vecinos directos a toda la red. En base a esto, cada nodo puede generar y mantener una tabla de enrutamiento actualizada. Esto permite obtener un camino óptimo gracias a un conocimiento más exacto del estado de la red. Sin embargo, esta técnica consume más ancho de banda por el uso repetitivo de paquetes para transmitir el estado de la red.
- Hierarchical (HR): Se divide la red jerárquicamente, usualmente por características de los UAVs, y en cada nivel un UAV es el encargado de comunicar con los otros niveles.

- Mobility Information (MI): Se utiliza la información de movimientos como posiciones y velocidades para elegir en cada retransmisión los siguientes nodos. Requiere una alta frecuencia de intercambios de paquetes con dicha información entre los nodos.
- Energy-Efficient (EE): Se pretende aislar de la transmisión a los nodos con bajo nivel de energía. Sin embargo, es necesario combinarlo con otras técnicas para evitar pérdidas de paquetes.
- Static (STA): La tabla de enrutamiento es estática. No soporta la variabilidad de la topología. Puede ser útiles en redes pequeñas y pruebas.
- Secure (SC): Se incluyen mecanismos de seguridad para detectar UAV maliciosos y evitarlos. Requiere procesamiento complejo en los UAVs.
- Broadcast (BR): Los paquetes de datos son diseminados por toda la red hasta llegar a su destino. Asegura la transmisión pero puede provocar congestión por todas las copias de paquetes generados.

Además de las presentadas, la técnica de enrutamiento basada en Vector-Distancia [20] también es aplicada en el diseño de protocolos para MANET. A diferencia de la técnica de estado de enlace (LST), la cual envía la información de sus vecinos a toda la red, esta técnica envía la información de la topología completa que conoce de la red a sus vecinos directos. Al igual que en las terrestres, ambas técnicas han sido utilizadas para el desarrollo de varios protocolos de enrutamiento en redes Ad Hoc.

2.2.2.2. Clasificación de protocolos

En base a su funcionamiento, los protocolos pueden ser agrupados típicamente en reactivos, proactivos, híbridos y geográficos. En la figura 2.4 se muestra un esquema de esta clasificación.

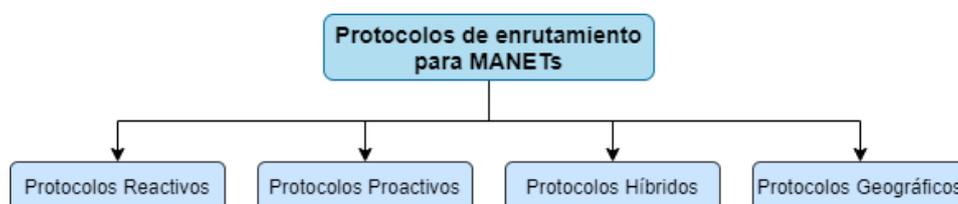


Figura 2.4: Clasificación típica de protocolos de enrutamiento para MANETs aéreas
Elaboración propia.

- Los protocolos reactivos obtienen el camino desde el nodo origen hacia el nodo destino solo cuando existe un requerimiento de transmisión. En otras palabras, no conocen inicialmente la topología de la red.
- Los protocolos proactivos intercambian periódicamente paquetes de control con información para mantener un conocimiento parcial o total de la red. Esto les permiten obtener el camino hacia el nodo destino más rápido que los protocolos reactivos a costa del incremento en el uso del ancho de banda por los paquetes de control.
- Los protocolos híbridos, combinan las categorías anteriores. Usualmente dividen a la red en zonas donde mantienen un conocimiento de la red en todos los nodos por cada zona proactivamente. En caso de necesitar transmitir entre zonas, un protocolo reactivo es utilizado para ello.
- Los protocolos geográficos consideran la información de geolocalización del GPS en el UAV para obtener nuevas métricas de comparación. Con ellas pue-

den calcular la estabilidad de los enlaces. Además, los protocolos pueden usar algoritmos especiales para limitar la difusión de paquetes de control por su ubicación.

El funcionamiento de los protocolos típicos más relevantes para redes MANET se describe brevemente en la sección 2.3.1.

Aunque inicialmente la mayoría de los protocolos diseñados para redes MANET fueron considerados para el despliegue de redes aéreas, estos han resultado insuficientes debido a que la dinamicidad de la topología agrega nuevos retos para su diseño (movilidad de los nodos, variabilidad en la calidad de los enlaces, continuo ingreso y salida de nodos en la red, limitados recursos de cómputo, limitados recursos de energía, entre otros). En consecuencia, nuevos protocolos se han propuesto combinando diferentes técnicas y algoritmos. Tanto en [19] como en [16] se presentan nuevas clasificaciones inclusivas para las características de los nuevos protocolos de enrutamiento. La versión de [16] se muestra en la figura 2.5.

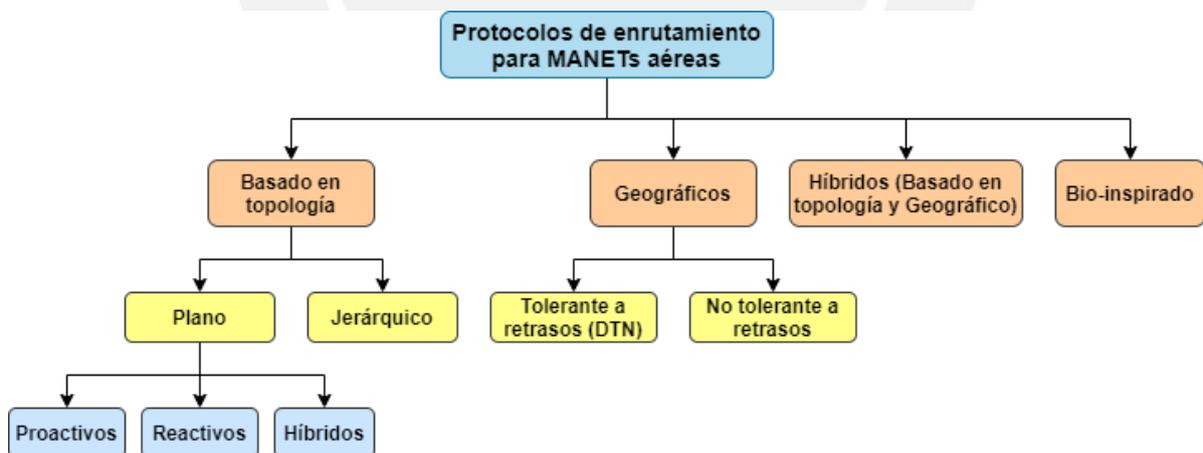


Figura 2.5: Nueva categorización para protocolos de enrutamiento en MANETs aéreas

Tomado de [16]. Elaboración propia.

En el primer nivel, las categorías principales son las siguientes:

- Basado en topología: La información de enrutamiento es obtenida de acuerdo con la información de la topología de la red. Se puede tomar en consideración si la red está dividida jerárquicamente o no. En caso lo estuviera, las categorías se subdividen en proactiva, reactiva e híbrida.
- Geográficos: La información de enrutamiento es obtenida con las ubicaciones geográficas de los UAVs. Se subdividen los protocolos de acuerdo con si son tolerantes a retrasos (DTN) o no.
- Híbridos: Mezcla las técnicas Basado en topología y Geográficos.
- Bio-inspirado: La información de enrutamiento es obtenida por mecanismos inspirados en fenómenos naturales (colonias de hormigas, abejas o aves)

Como se observa, los nuevos retos que presentan las redes MANET aéreas han sido motivación para la investigación y desarrollo de diversas propuestas de enrutamiento. Cada propuesta busca hacerles frente a diferentes escenarios, en especial los altamente dinámicos. En la última parte de este capítulo se estudia algunas de estas propuestas.

2.3. Protocolos de Enrutamiento

La investigación y desarrollo de protocolos de enrutamiento para MANETs se ha venido realizando por varios años mientras crecía el interés en las soluciones Ad Hoc descentralizadas como redes de múltiples aplicaciones. Al ser redes pensadas para adaptarse en entornos dinámicos, nuevos retos surgen para llevar a cabo las tareas de enrutamiento. Los distintos protocolos que han venido siendo planteados intentan

sobrepasar estos inconvenientes utilizando diferentes técnicas, las cuales han sido revisadas en la sección 2.2.2.1.

En las siguientes secciones se describirá brevemente algunos de los más resalta-ntes protocolos típicos (sección 2.3.1) y actuales (sección 2.3.2) como breve estado del arte en esta área de investigación.

2.3.1. Protocolos típicos

En la figura 2.4 se mostró una clasificación típica para protocolos de enrutamiento dividida en Proactivos, Reactivos, Híbridos y Geográficos. Algunos de los protocolos más conocidos que son agrupados en esta taxonomía se describen en esta sección.

2.3.1.1. *Protocolos Proactivos*

Se caracterizan por intercambiar periódicamente paquetes con información de la red a todos los nodos permitiendo que cada uno mantenga actualizado su propia tabla de enrutamiento. Su principal inconveniente es el congestionamiento del ancho de banda por los paquetes periódicos.

- Optimized Link State Routing (OLSR): [21]

Basado en la técnica de estado de enlace (LST). La optimización de este protocolo respecto de la técnica mencionada es que no todos los nodos retransmiten los paquetes de control conteniendo las tablas de enrutamiento hacia el resto de la red. En este caso, solo algunos nodos son seleccionados para esta función disminuyendo la congestión del tráfico de la red pero garantizando aun la difusión en la red completa. Los nodos elegidos como repetidores se denominan Multi Point Relay (MPR).

- Fisheye State Routing (FSR): [22]

Basado en la técnica de estado de enlace (LST). Optimiza el uso del ancho de banda con el envío de paquetes de control más pequeños y con mayor frecuencia a los nodos en su alcance “fisheye” . Este término se refiere a que los nodos intercambian información de estado de enlace con sus vecinos con una frecuencia que depende de la distancia al destino. En consecuencia las rutas que siguen los paquetes se vuelven progresivamente más precisas conforme se acercan al destino.

- Distance Routing Effect Algorithm (DREAM): [23]

Basado en la técnica de estado de enlace (LST) pero además considera la ubicación geográfica de los nodos para obtener sus velocidades. Los nodos que se mueven más rápido necesitan mayor frecuencia de actualización para sus tablas de enrutamiento que los que se mueven lento. En consecuencia, la frecuencia de difusión de los paquetes de control es proporcional a la velocidad de los nodos. Además, se limita esta difusión de acuerdo con su distancia geográfica.

- Destination Sequenced Distance vector (DSDV): [24]

Basado en la técnica de vector-distancia. Optimiza el uso del ancho de banda con el uso de dos tipos de paquetes de actualización: “full-dump” (Toda la información disponible) e “incremental” (Solo la diferencia desde el ultimo full-dump). La frecuencia de envío para ambos tipos de paquetes es configurable de acuerdo con las necesidades de la red.

- Hazy Sighted Link State (HSLs): [25]

Basado en la técnica de estado de enlace. Optimiza el uso del ancho de banda a través de variar el alcance de los paquetes de control. De esta manera los nodos más alejados reciben actualizaciones con menor periodicidad que los cercanos.

HSLs modela el comportamiento de la red y encuentra valores exactos para el alcance de cada paquete optimizando el "Total overhead" ("overhead" que considera el efecto del uso de rutas no óptimas) de la red.

- Better Approach To Mobile Adhoc Networks (BATMAN): [26]

Sus paquetes de control periódicos no contienen información de la topología de la red, sino solo la identificación del nodo originador del paquete. Este protocolo mantiene un ranking de calidad de los enlaces por cada nodo y hacia cada destino, el cual depende de la cantidad de paquetes recibidos por ese enlace provenientes de un destino en particular. En una transmisión cada nodo elige el siguiente nodo por el cual enviar el tráfico en base a este ranking. De esa manera ningún nodo conoce la topología completa de la red pero igual envían por el que consideran su mejor enlace hacia ese destino.

2.3.1.2. *Protocolos Reactivos*

Se caracteriza por intentar evitar la congestión del ancho de banda al no utilizar intercambio de paquetes periódicos. Calcula la ruta óptima cuando existe el requerimiento de una transmisión ("on-demand"). Su principal inconveniente es la mayor latencia y la baja reacción ante un cambio en la topología, lo cual se realiza en escenarios dinámicos como las redes aéreas en zonas de desastre. Suelen dividirse en dos tipos: "Source Routing" (cada paquete de datos lleva la dirección completa de inicio a fin) y "Hop-by-Hop Routing" (cada paquete solo lleva la dirección del destino y de su siguiente salto). El primer caso reduce la latencia pero es menos adaptable ante cambios en la red. El segundo caso mejora la adaptabilidad pero compromete la latencia [27].

- Dynamic Source Routing (DSR): [27]

Basado en el tipo "Source Routing" . Utiliza en conjunto dos mecanismos: Descubrimiento (Se utiliza cuando la fuente no conoce previamente un camino hacia su destino. Luego de usarla se guarda en cache temporalmente) y mantenimiento de rutas (Se usa para detectar si una ruta previa ya no es válida por el cambio en la topología. En ese caso se puede usar otra ruta conocida o volver a descubrir una nueva ruta). Presenta el inconveniente de que la data correspondiente a la dirección completa de inicio a fin crece de acuerdo con el tamaño de la red.

- Adhoc On demand Distance Vector (AODV): [28]

Basado en el tipo "Hop-by-Hop Routing" . Utiliza un mecanismo similar para el descubrimiento de rutas. Sin embargo, este protocolo solo incluye la información del destino y de su siguiente salto y se repite en cada nodo. Además, este protocolo si incluye una tabla de enrutamiento que guarda las rutas descubiertas y otros parámetros asociados. Un registro de esta tabla es borrado si no es usado recientemente.

2.3.1.3. *Protocolos Híbridos*

Combinan mecanismos proactivos y reactivos para el enrutamiento de paquetes en la red MANET. Permite reducir la latencia y la congestión en la red optimizando el envío de paquetes de control.

- Zone Routing Protocol (ZRP): [29]

Divide a la red en zonas donde mecanismos proactivos son utilizados dentro de cada una. En contraste, la comunicación entre zonas utiliza mecanismos reac-

tivos. Este protocolo aprovecha el hecho de que la mayor parte del tráfico en redes MANETs se realizan entre nodos cercanos.

- Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA): [30]

Tiene las modalidades proactivas y reactivas. Los nodos solo mantienen información sobre sus vecinos adyacentes. Se definen sesiones TORA para cada transmisión. Por cada sesión, cada nodo se asigna una "altura" . El nodo que desea transmitir sólo puede hacerlo hacia un nodo con una menor "altura" que la suya. De no existir, el nodo disminuye su "altura" hasta un poco menos que la del nodo adyacente con la menor altura. Se repite el proceso hasta que el tráfico llegue eventualmente a su destino. En su modo reactivo, el tráfico se envía con paquetes para descubrir una ruta solicitada desde la fuente hacia el destino. En su modo proactivo, el tráfico se envía con paquetes de control periódicamente para actualizar la tabla de enrutamiento de cada nodo.

2.3.2. Protocolos nuevos

En la figura 2.5 se mostró una nueva categorización que permite agrupar con mayor exactitud a los protocolos de enrutamiento que se vienen proponiendo recientemente. La mayoría de estos protocolos están inspirados en los típicos que se estudiaron en la sección anterior pero combinan nuevas técnicas para obtener métricas de comparación que toman en cuenta factores como la estabilidad de los enlaces, su congestión, los recursos de cómputo o la energía restante del UAV.

Dentro de *Topology-based*, este trabajo destaca las diversas optimizaciones para el protocolo OLSR debido a su popularidad entre los demás protocolos revisados en la sección anterior. Estas variantes combinan su funcionalidad base con otras técnicas en pro de mejorar su rendimiento en escenarios altamente dinámicos. Además, son

considerados nuevos factores como la ubicación de los UAVs, los paquetes en cola de transmisión o el nivel de energía restante. Esto implica el uso de nuevas métricas con las cuales comparar y dar prioridad en la selección de MPRs y enlaces.

Debido a su similitud y buscando su mejor comprensión, los resultados de la investigación realizada sobre estos protocolos son organizados en la tabla 2.2. Estos son diferenciados a partir de la información adicional, las métricas y el proceso de decisión de cada uno.

Tabla 2.2: Comparación de las variantes de OLSR

Protocolo	Información Adicional	Métricas utilizadas	Proceso de decisión
P-OLSR [31]	- GPS	- Speed Weighted ETX (acercamiento o alejamiento)	Utiliza la data del GPS para predecir si ambos nodos de un enlace se están acercando (Speed-Weighted ETX) y darle prioridad al enlace
ML-OLSR [32]	- GPS - Cantidad de paquetes esperando para transmitirse en la capa MAC	- Grado de estabilidad del nodo (SDN) - Grado de accesibilidad del nodo (RDN) - Grado de congestión del nodo (paquetes en cola)	Utiliza la data del GPS para obtener la estabilidad (variabilidad espacial) entre dos nodos (SDN). La cantidad de nodos para los cuales un nodo en específico es su enlace más estable representa su accesibilidad (RDN). La prioridad del enlace se asigna al mayor RDN y menor congestión.
LTA-OLSR [33]	- Intensidad de señal recibida (RSSI) - Tiempo en el que el nodo estará ocupado (NAV) - Promedio de paquetes esperando en Buffer	- Calidad del enlace - Grado de congestión del nodo (paquetes en cola)	La calidad de un enlace se mide en base a la varianza del RSSI. La congestión del nodo se mide combinando el NAV y la cantidad de paquetes en el Buffer. La prioridad del enlace se asigna por mejor calidad y menor congestión.

OLSR-PMD [34]	<ul style="list-style-type: none"> - GPS (posición y velocidad) - Cantidad y retraso de cada paquete en la cola de la capa MAC 	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilidad del nodo - Accesibilidad del nodo - Retraso promedio en el nodo 	Usando el algoritmo del filtro de Kalman se predice la movilidad del nodo y con ello el tiempo de vida del enlace, el cual es proporcional a la estabilidad de este. La cantidad de nodos para los cuales un nodo en específico es su enlace más estable representa su accesibilidad. Se emplea un modelo de movimiento autorregresivo para predecir el retraso promedio del enlace. La prioridad se asigna por la movilidad y accesibilidad mientras los nodos se estén acercando. La elección de la ruta considera el retraso promedio.
MPEA-OLSR [35]	<ul style="list-style-type: none"> - Retraso promedio de paquetes en la capa MAC. - Energía restante en el nodo. - GPS 	<ul style="list-style-type: none"> - Grado de congestión en la capa de enlace del nodo. - Energía residual - Tiempo de expiración del enlace 	Suma las métricas con pesos diferentes. Este valor es utilizado para dar prioridad al enlace.

Nota. Fuentes indicadas en la primera columna. Elaboración propia.

En este punto se destaca la propuesta del uso de información adicional de otras capas fuera de la capa de enrutamiento como los son el RSSI, la data del NAV o el GPS. Esta inclinación parece deberse a la influencia de otros fenómenos externos que no son considerados en las redes fijas terrestres pero afectan de manera significativa a las redes aéreas por su naturaleza dinámica.

3. Estudio Comparativo Sobre Redes Aéreas para Emergencias

En el presente trabajo se ha realizado una cuidadosa investigación sobre consideraciones técnicas involucradas en el diseño e implementación de redes aéreas formadas por UAVs. En especial, las soluciones multi-salto (MANET) fueron el centro del trabajo relacionado a los protocolos de enrutamiento. Este capítulo continua el trabajo revisitando algunas fuentes y complementando con otras para realizar una comparación sobre temas importantes encontrados durante la investigación inicial y/o derivando criterios para casos mas específicos.

En primer lugar, los beneficios de una solución aérea sobre las soluciones terrestres son fundamentados mediante una comparación entre sus soluciones mas representativas. (sección 3.1). En segundo lugar, de los requerimientos y retos estudiados se derivan criterios de comparación con un enfoque en situaciones de emergencia (sección 3.2). Finalmente, los protocolos revisados son organizados cuidadosamente y se comenta cuales serían los más adecuados según los criterios recién derivados (sección 3.3).

3.1. Comparación Entre Redes Terrestres y Redes Aéreas

Sobre las redes terrestres, La MDRU es una solución que integra varios equipos de telecomunicaciones con gran capacidad en un medio de transporte terrestre capaz de llevarlo a la zona de desastre. Tiene la característica de ser autónoma pues también incluye generadores de energía. Típicamente la MDRU es utilizada para restablecer el servicio de comunicación celular pero también está equipada con transmisores satelitales para conectar la red de emergencia directamente con el internet y la red Core

celular [36]. Además, la MDRU puede tener interfaces de fibra óptica con potentes transmisores que lo conecten directamente a la red Core si el escenario lo permite. Es importante notar que el acceso vía satélite o fibra óptica hacia la red Core le permite al MDRU evitar la congestión de los sistemas de comunicación locales [11].

Los MDRUs pueden ser utilizados en la fase de respuesta y la fase de recuperación. Primero proveería de comunicación de emergencia a la zona afectada, la cual podría estar un poco limitada. Posteriormente se empezarían los trabajos de recuperación de la red progresiva. La MDRU podría dejar de utilizar el enlace satelital para conectarse a los nuevos equipos locales manteniendo la conectividad en zonas afectadas y mejorando el servicio [11].

Además, existen soluciones complementarias al MDRU que permiten mejorar su capacidad y/o extender su cobertura. Por un lado, algunas de las interfaces de fibra óptica pueden ser conectadas con la infraestructura no dañada en la zona de desastre para mejorar la capacidad del servicio brindado [11]. Por otro lado, las redes MANET aéreas pueden ser desplegadas en zonas con poca línea de vista para extender su cobertura gracias a la utilización de distintos tipos de equipos inalámbricos disponibles conectados unos con otros formando mallas que comparten la señal [36].

Las redes MANET utilizan enlaces dispositivos con dispositivo entre todos sus nodos permitiendo que cada uno transmita sin la necesidad de un equipo central. Este tipo de enlaces es denominado Ad Hoc. Diferentes equipos inalámbricos pueden unirse para formar una red descentralizada, lo cual da facilidades para el cumplimiento de los requerimientos de una red de rápido despliegue [10]. En particular, la utilización de UAVs como nodos de la red MANET provee de nuevas características a la red permitiendo que pueda ser utilizada como un sistema de comunicación independiente que restablezca la conectividad en las zonas afectadas y/o de soporte de

comunicación para los equipos de búsqueda y rescate [15].

Una red aérea de rápido despliegue puede ser adaptable fácilmente a diversos escenarios evitando los inconvenientes de acceso a la zona afectada por tierra. Desde el aire, la red de UAVs pueden proveer de una amplia cobertura utilizando enlaces con línea de vista libre de obstáculos. Los múltiples UAVs pueden ser configurados para auto-organizarse y auto-repararse en respuesta a la movilidad de los equipos permitiendo una alta escalabilidad [12]. En caso de fallas en los nodos o interferencias en la comunicación, la red puede mantener la transmisión gracias a los protocolos de enrutamiento configurados que detectan estas fallas y redirigen la comunicación por otro camino [37].

La flexibilidad que le otorga la movilidad de los nodos aéreos permite diversas topologías que pueden hacerle frente a escenarios complicados. Por ejemplo, en [38] se proponen tres escenarios de aplicación:

- Los UAVs pueden cooperar con las estaciones base celulares sobrevivientes para extender la cobertura inalámbrica.
- En el caso de no haber estaciones base disponibles, los UAVs pueden actuar como estaciones base aéreas para proveer comunicación inalámbrica.
- Los UAVs pueden actuar como retransmisores para comunicar zonas sin líneas de vista dentro de la zona afectada.

Además, en el mismo trabajo [38] se propone la utilización de las redes MANET aéreas para extender la cobertura inalámbrica de unidades móviles MDRUs en zonas sin línea de vista. En la tabla 3.1 se compara las características de ambas tecnologías.

Tabla 3.1: Comparación entre las MDRUs y las redes MANET con UAVs

MDRU (terrestre)	MANET con UAVs (aérea)
Equipamiento complejo y de grandes dimensiones físicas	Equipamiento simple y de pequeñas dimensiones físicas
Mayor capacidad de comunicación que la red MANET área	Menor capacidad de comunicación que el MDRU
Baja adaptabilidad. Despliegue condicionado a las facilidades de acceso terrestre a la zona afectada	Alta adaptabilidad a múltiples escenarios
Equipos con alta autonomía energética. Pueden funcionar por varias horas	Los UAVs tienen actualmente baja autonomía energética. Pueden funcionar entre 30 min y 1 hora aproximadamente
Puede ser utilizada para dar cobertura celular, wifi, wimax, etc	Puede ser utilizada para dar cobertura celular, wifi, wimax, etc
Puede acceder directamente a Internet y/o a la red core por medio de sus enlaces satelitales o fibra óptica	No puede acceder directamente a Internet y/o a la red Core
Puede tener problemas de línea de vista desde la tierra	Tiene pocos problemas de línea de vista desde el aire
Amplia cobertura con una sola unidad	Requiere de varios UAVs formando una red para poder brindar amplia cobertura
La red no es auto reconfigurable	La red es auto reconfigurable
Baja escalabilidad pues no tiene mecanismos para redistribuir su topología y enrutamiento	Alta escalabilidad. Permite añadir y quitar UAVs fácilmente
Puede ser utilizada en la fase de respuesta y la fase de recuperación	Solo es utilizada en la fase de respuesta
Se puede complementar utilizando la infraestructura de fibra óptica y/o equipos inalámbricos disponibles formando una red MANET	Se puede complementar utilizando equipos inalámbricos disponibles formando una red MANET en tierra

Nota. Datos de [11], [12], [36], [15], [37] y [38]. Elaboración propia.

Las redes MANET aéreas presentan nuevas oportunidades como redes de rápido despliegue al ser adaptables a diferentes circunstancias y de bajo costo comparado con las redes en tierra. Sin embargo, se necesita sobrepasar diversos retos en su diseño e implementación relacionados a su organización en el aire y, en especial, a sus mecanismos de enrutamiento que deben considerar la dinamicidad de la topología y otros factores como los recursos de procesamiento o energía.

3.2. Criterios de Comparación para el Enrutamiento de Redes Aéreas

La continua investigación en el área de enrutamiento ha hecho necesaria el desarrollo de lineamientos y clasificaciones que puedan ser utilizadas por futuros investigadores (revisadas en la sección 2.2.2). Teniendo presente la complejidad de un análisis de este tipo, este trabajo deriva algunos criterios de comparación para protocolos de enrutamiento con el objetivo de ser aplicados en redes MANET aéreas que provean el servicio de cobertura inalámbrica de emergencia.

Para esta aplicación se considera prioridades el incremento de la confiabilidad de la red (reducción de pérdidas de paquetes) y la reducción de la latencia (retrasos en la transmisión). Ambos requerimientos son críticos para proveer de una comunicación oportuna a los afectados en la zona del desastre. A continuación se presentan estos criterios en el orden de prioridad propuesto.

1. Optimización del uso de ancho de banda:

Las características variables de los entornos aéreos, en especial los de desastres, son la razón para que muchos protocolos incluyan mecanismos de enrutamiento proactivos que mantenga información de la red y/o estén atentos a sus cambios. El gran inconveniente del envío repetitivo de paquetes de control es que

pueden contribuir en gran medida a la congestión del ancho de banda de la red ("flooding"). El algoritmo utilizado por el protocolo debe intentar minimizar el impacto de este inconveniente.

2. Detección de la calidad de los enlaces:

La movilidad de los UAVs en el aire es una de las características clave que diferencia a esta tecnología de las otras redes de rápido despliegue. Aunque esto permite que la red multisalto sea adaptable a diferentes ambientes pues se evitan los obstáculos en tierra, también su desplazamiento implica una mayor inestabilidad de los enlaces. En consecuencia, la intensidad o calidad de la señal recibida va a presentar variaciones. Esto puede causar un crecimiento en las pérdidas de paquetes y, de estar en constante movimiento, la red podría estar cambiando constantemente los mejores caminos para la transmisión. En ese sentido, los protocolos de enrutamiento deben considerar la calidad de los enlaces como una métrica importante para la elección de las rutas con el fin de optimizar la confiabilidad de los enlaces.

3. Detección de la congestión de los enlaces:

Otro factor importante que influye en las pérdidas de paquetes es la congestión de los enlaces. La elección del mismo enlace por su calidad puede ocasionar que la mayoría de los nodos intenten transmitir por dicho enlace congestionándolo. Por lo tanto, el protocolo de enrutamiento debe considerar la congestión actual de los enlaces como una métrica importante para la elección de rutas. Algunos protocolos plantean utilizar la cantidad de paquetes en cola para transmitirse en la capa MAC como una medida de la congestión. Además, también se ha propuesto aprovechar más información de la misma capa como el *Network Allocation Vector* (NAV) que contiene la duración en la que un enlace está ocupado.

4. Resiliencia de red:

Este criterio se refiere a la capacidad de la red para reconfigurarse lo más rápido posible ante un cambio brusco en la topología. Por ejemplo, el ingreso o salida de los de UAVs de la red y/o la degradación de enlaces por obstáculos e interferencias. Frente a este escenario, los algoritmos utilizados deben permitir detectar estos cambios lo antes posible y reenviar el tráfico de ser necesario.

5. Optimización de los costos de procesamiento:

La operación de los diferentes algoritmos y mecanismos de enrutamiento necesitan procesar toda la información necesaria por estos. Los UAVs, de acuerdo con su modelo, pueden tener diferentes capacidades de procesamiento. Sin embargo, esto influye directamente en el costo del equipo y en el gasto de energía para su funcionamiento. Es por ello que también es importante que los protocolos de enrutamiento optimicen el uso de recursos de cómputo.

La optimización del uso de ancho de banda es el primer criterio debido al gran daño que causa el *overhead* por los paquetes de control. Las colisiones de estos paquetes con los de datos reducen el *throughput* máximo que se pueda alcanzar en una transmisión. La detección de la calidad y congestión de los enlaces son información muy útil para la generación de métricas por el protocolo con las cuales puede tomar decisiones con mayor conocimiento de entorno. Ambos se vuelven muy importantes por la constante variabilidad a la que se enfrenta una red MANET aérea. Adicionalmente, la resiliencia de red cobra mayor importancia debido a que los UAVs son limitados de batería y requerirían reemplazos en plena operación. Por último, la baja optimización de los costos de procesamiento ocasionaría un mal funcionamiento del protocolo en UAVs con hardware limitado en recursos o incluso reduciría aun mas el tiempo de vida de la batería.

3.3. Comparación de Protocolos Revisados

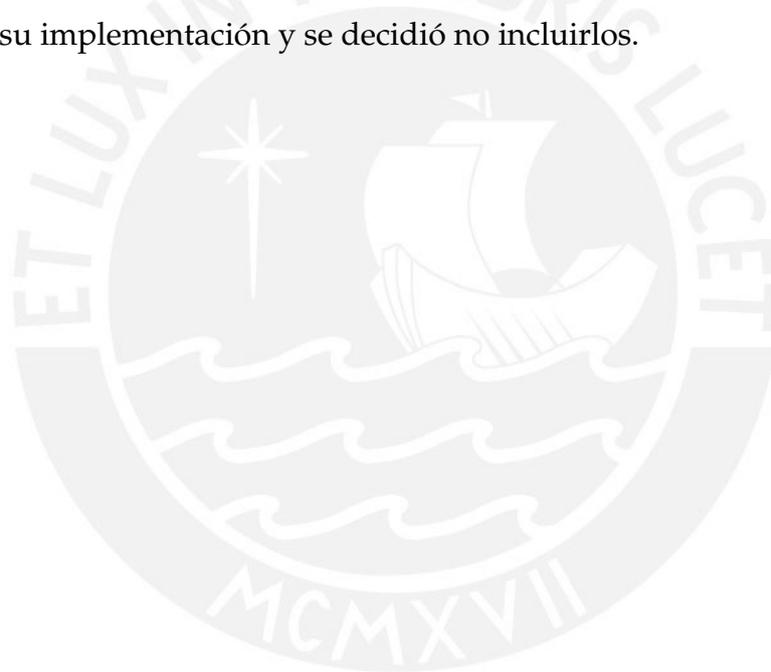
En esta investigación se han revisado algunos de los protocolos más relevantes para MANETs aéreas y se acaban de derivar algunos criterios de comparación para estos (sección 3.2). Esta sección revisita los protocolos típicos (sección 2.3.1) y los protocolos nuevos (sección 2.3.2) de la mano de los criterios recién derivados. La tabla 3.2 presenta esta breve comparación para todos los protocolos revisados.

Tabla 3.2: Comparación de protocolos revisados

Protocolo	Tipo	Criterios (sección 3.2)				
		1. Optimización del uso de ancho de banda	2. Detección de la calidad de los enlaces	3. Detección de la congestión de los enlaces	4. Resiliencia de red	5. Optimización de los costos de procesamiento
OLSR [21]	Proactivo	x	x			
FSR [22]	Proactivo	x	x			
DREAM [23]	Proactivo	x	x			
DSDV [24]	Proactivo	x	x			
HSLs [25]	Proactivo	x	x		x	
BATMAN [26]	Proactivo		x			x
DSR [27]	Reactivo	x				x
AODV [28]	Reactivo	x				x
ZRP [29]	Híbrido	x	x			
TORA [30]	Híbrido					x
P-OLSR [31]	Proactivo	x	x		x	
ML-OLSR [32]	Proactivo	x	x	x	x	
LTA-OLSR [33]	Proactivo	x	x	x	x	
OLSR-PMD [34]	Proactivo	x	x	x	x	
MPEA-OLSR [35]	Proactivo	x	x	x	x	

Nota. Fuentes indicadas en cada columna. Elaboración propia.

Los criterios son evaluados en base únicamente a la información presente en sus fuentes. Lo primero que se observa es la falta de los criterios 3 y 4 en la mayoría de los protocolos antiguos. Estos fueron pensados inicialmente para redes MANET sin considerar los nuevos retos que aparecerían en los años próximos. Esta falta fue observada y fue parte de la motivación para la creación de nuevos protocolos. Algunos de ellos fueron revisados y, como se observa en la tabla, agregan las consideraciones sobre los criterios 3 y 4 a través de variadas técnicas. La optimización en los costos de procesamiento fue considerada en su mayoría para los protocolos no proactivos pues no requieren de un cálculo periódico sobre sus rutas. Los protocolos proactivos pueden probablemente no tener inconveniente con los recursos de *hardware* pero esto dependerá de su implementación y se decidió no incluirlos.



4. Sugerencias para el Diseño de Redes Aéreas de Emergencia

Se culmina esta investigación recogiendo los resultados del trabajo realizado como insumos para el diseño de una solución del problema inicial. En el capítulo 1 se observó como los desastres naturales pueden comprometer seriamente a las infraestructuras de telecomunicaciones. Sin embargo, redes especializadas en la gestión de desastres podrían ser claves ayudando a la recuperación de los afectados. Entre las diversas aplicaciones, este trabajo investigó a las redes aéreas formadas por UAVs como una red de transporte (*backbone*) de emergencia en la etapa de respuesta al desastre.

Partiendo de esta premisa, el presente capítulo describe brevemente algunas sugerencias para el diseño de redes aéreas de transporte. Se considera los requerimientos más importantes que deberían ser considerados y las características de enrutamiento más adecuadas para este escenario.

4.1. Requerimientos para Redes Aéreas de Emergencias

Respecto a los requerimientos comentados en la sección 2.1 este trabajo resalta los siguientes puntos:

- Requerimientos para el sistema de comunicación independiente:

En este trabajo, el objetivo principal es restablecer infraestructuras con redes de rápido despliegue. Previo al diseño, es muy necesario tener claro las aplicaciones y sus necesidades específicas que se desea soportar. Como se observó en los capítulos anteriores, la complejidad derivada por la cantidad de variables presentes en una red de este tipo hace necesaria limitar los propósitos de la red a

fin de optimizar el desempeño de la misma.

- **Requerimientos de red:**

Definiendo la aplicación específica, se debe proceder a revisar con detalle los requerimientos de red como *Throughput*, latencia, pérdida de paquetes, entre otros. Cada uno de estos debe permitir conseguir llegar a un balance que optimice algunos de ellos. Por ejemplo, para llamadas de Voz, es más importante la disminución de la latencia que la pérdida de paquetes. Adicionalmente, una red aérea en un escenario variable puede enfrentar cambios repetitivos en su topología. El intercambio de información para mantener coordinados a todos los UAVs tendría efecto sobre el *total overhead*. Esta inconveniente es controlado por la elección y configuración de los protocolos de enrutamiento más adecuados.

- **Tráfico de coordinación:**

Aquí se considera la existencia de una entidad central que coordina las ubicaciones de los nodos de toda la red. Los UAVs en la red aérea deberían coordinar sus movimientos haciendo uso del ancho de banda para difundir esta información desde algún nodo central. En ese sentido, el ancho de banda disponible para los usuarios podría disminuir. Un correcto dimensionamiento del tráfico de coordinación ayudará a tomar mejores decisiones de diseño en los otros aspectos.

4.2. Enrutamiento para Redes Aéreas de Emergencia

En relación al enrutamiento, este trabajo pudo revisar los retos especiales que presenta en redes aéreas con topologías y escenarios variables. Aunque existen varias técnicas de enrutamiento y protocolos basados en ellas, estos ya no son suficientes para las necesidades actuales. Nuevos protocolos han venido siendo propuestos y

evaluados. Algunos de los más relevantes fueron descritos y comparados en esta investigación.

Para la red de emergencia deseada la sección 3.2 derivó algunos criterios para poder comparar protocolos respecto a las necesidades identificadas. De acuerdo a la comparación realizada en la tabla 3.2, las variantes de OLSR son las que cumplen con la mayoría de estos criterios.

Este trabajo de investigación destaca las características de constante auto-reconfiguración de un protocolo proactivo como necesarias por la naturaleza variable del escenario deseado. Las variantes de OLSR cumplen todas con esto pero adicionalmente agregan nuevas métricas que les permiten detectar la congestión de la red o responder con mas prontitud a cambios en la topología. Sin embargo, estas son implementaciones no publicas para su uso. Por lo tanto, no son posibles de ser usadas en despliegues reales para redes de emergencia.

La mayoría de los protocolos típicos si cuentan con implementaciones publicas y de libre uso. Entre ellas, el protocolo OLSR cuenta con una ampliamente utilizada que se ha venido actualizando con los años [39]. La ventaja de esta implementación es que tiene la posibilidad de agregar extensiones a su funcionamiento base. Estas pueden realizar modificaciones como cambiar las métricas utilizadas o variar el *Time to Live* de los paquetes. Este última es una funcionalidad de HSLs con el objetivo de reducir el *Total overhead*.

En síntesis, este trabajo sugiere el uso de protocolos proactivos que incluyan métricas que les permitan medir la congestión de la red y responder con mayor prontitud a cambios en su topología. Sin embargo, considerando las implementaciones disponibles, este trabajo sugiere comenzar las investigaciones en esta área con la versión de OLSR disponible en [39] aprovechando sus extensiones para evaluar otras funcio-

nalidades. Incluso, al ser un proyecto de código libre, este trabajo fomenta la idea de realizar modificaciones incrementando el espectro de funcionalidades disponibles.



Conclusiones

- Se realizó un estudio de los requerimientos técnicos de comunicaciones de una red MANET aérea que de soporte en una situación de emergencia. Se revisaron todos los requerimientos concernientes a su autogestión en el aire y a la aplicación que pueda tener. Se destaca que las redes de rápido despliegue para desastres deben tener en cuenta la confiabilidad de la red y la disminución de su latencia para optimizar su función como red de transporte ("backbone") alterna.
- Se realizó un estudio de los retos técnicos de comunicaciones que presenta una red MANET de UAVs. Se revisó que la arquitectura de la solución depende directamente de las necesidades de la aplicación y que varía de acuerdo con su organización aérea y/o el trabajo en conjunto de los UAVs. Además se revisaron los retos referentes al enrutamiento en redes MANET donde diversas técnicas pueden ser combinadas para optimizar su funcionamiento de acuerdo con el escenario deseado.
- Se revisó el estado del arte de los protocolos de enrutamiento propuestos para las MANETs aéreas. Se encontró que los protocolos típicos o más antiguos dejaron de ser suficientes para la creciente demanda en redes aplicadas a entornos dinámicos que necesitan mantener un nivel deseado de desempeño. Por ende, nuevos protocolos han venido siendo propuestos considerando mayor información antes de realizar decisiones. Se revisaron y compararon algunos de estos protocolos basados en el típico OLSR.
- Se propusieron criterios de comparación para protocolos de enrutamiento apli-

cables a una red MANET de UAVs. Se destaca la importancia de la optimización de los recursos del ancho de banda por su influencia en la pérdida de paquetes y la detección la calidad y congestión de los enlaces como información útil para la generación de métricas que consideren el escenario dinámico de una red aérea. Adicionalmente, estos criterios fueron utilizados para evaluar los protocolos revisados previamente.



Bibliografía

- [1] H. Mcheick y Z. EL Khaled, "Case studies of communications systems during harsh environments: A review of approaches, weaknesses, and limitations to improve quality of service", *The International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/1550147719829960>. dirección: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1550147719829960>.
- [2] R. DesRoches, M. Comercio, M. Eberhard y W. Mooney, "Overview of the 2010 Haiti Earthquake", *Earthquake Spectra*, vol. 27, n.º 1, pág. 21, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.3630129>. dirección: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1193/1.3630129>.
- [3] N. R. ITU-T Focus Group on Disaster Relief Systems y Recovery, "Technical Report on Telecommunications and Disaster Mitigation", ITU-T, inf. téc., 2013, pág. 73. dirección: https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/dnrrr/Documents/Technical%7B%5C_%7Dreport-2013-06.pdf (visitado 22-12-2020).
- [4] A. Adhikari, B. Hasset, R. Lamsal y S. Topkay, "Nepal's 2015 Earthquake: Communication and the Marginalization of Dalits", *Digital WPI*, 2016. dirección: <https://digitalcommons.wpi.edu/iqp-all/2908/>.
- [5] IFRC, "Haiti case study", inf. téc. dirección: <https://www.ifrc.org/fr/what-we-do/beneficiary-communications/haiti-case-study/>.
- [6] J. M. Roldan y F. Ordoñez, "ITU Guidelines for national emergency telecommunication plans", ITU Publications, inf. téc., 2019, pág. 94. dirección: <https://www.itu.int/pub/D-HDB-EMER-2019> (visitado 22-12-2020).

- [7] N. R. ITU-T Focus Group on Disaster Relief Systems y Recovery, “Promising technologies and use cases-Part I, II and III”, ITU-T, inf. téc., 2014, pág. 21. dirección: <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/drnrr/Documents/fg-drnrr-tech-rep-2014-2-1-Framework-usecase-part-1-2-3.pdf> (visitado 22-12-2020).
- [8] —, “Promising technologies and use cases-Part IV and V”, ITU-T, inf. téc., 2014, pág. 127. dirección: <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/drnrr/Documents/fg-drnrr-tech-rep-2014-2-2-Framework-usecase-part-4-5.pdf> (visitado 22-12-2020).
- [9] —, “Requirements for Disaster Relief System”, ITU-T, inf. téc., 2014, pág. 31. dirección: https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/drnrr/Documents/fg-drnrr-tech-rep-2014-5-DR%7B%5C_%7Drequirement.pdf (visitado 22-12-2020).
- [10] —, “Requirements for Network Resilience and Recovery”, ITU-T, inf. téc., 2014, pág. 28. dirección: <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/drnrr/Documents/fg-drnrr-tech-rep-2014-6-NRR-requirement.pdf> (visitado 22-12-2020).
- [11] —, “Requirements on the improvement of network resilience and recovery with movable and deployable ICT resource units”, ITU-T, inf. téc., 2014, pág. 25. dirección: <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/drnrr/Documents/fg-drnrr-tech-rep-2014-7-MDRU-requirement.pdf> (visitado 22-12-2020).
- [12] K. Miranda, A. Molinario y T. Razafindralambo, “A survey on rapidly deployable solutions for post-disaster networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 74, n.º 4, págs. 117-123, 2016. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7452275. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7452275>.

- [13] S. Hayat, E. Yanmaz y R. Muzaffar, "Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, n.º 4, págs. 2624-2661, 2018. DOI: 10.1109/COMST.2016.2560343.
- [14] C. Santivañez, B. McDonald, I. Stavrakakis y R. Ramanathan, "On the Scalability of Ad Hoc Routing Protocols", en *Proceedings of IEEE INFOCOM 2002*, New York, 2002. dirección: <http://www.cesarsantivaney.com/papers/infocom2002.pdf>.
- [15] M. Erdelj y E. Natalizio, "UAV-assisted disaster management: Applications and open issues", *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2016. DOI: 10.1109/ICCNC.2016.7440563. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7440563>.
- [16] D. Shumeye, U. Sa'ad, N.-N. Dao, W. Na y S. Cho, "Routing in Flying Ad Hoc Networks: A Comprehensive Survey", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 22, n.º 2, págs. 1071-1120, 2020. DOI: 10.1109/COMST.2020.2982452.
- [17] L. Gupta, G. Vaszkun y R. Jain, "Survey of Important Issues in UAV Communication Networks", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, n.º 2, págs. 1123-1152, 2016. DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297.
- [18] I. Bekmezci, O. Koray Sahingoz y Ş. Temel, "Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey", *Ad Hoc Networks*, vol. 11, n.º 3, págs. 1254-1270, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>.
- [19] O. S. Oubbati, M. Atiquzzaman, P. Lorenz, M. H. Tareque y M. S. Hossain, "Routing in Flying Ad Hoc Networks: Survey, Constraints, and Future Challenge Perspectives", *IEEE Access*, vol. 7, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2923840.

- [20] C. Perkins y E. Belding-Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing", en *Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, New Orleans, LA, USA, USA: IEEE, 1999. DOI: 10.1109/MCSA.1999.749281.
- [21] T. H. Clausen y P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)", *RFC*, 2003. dirección: <https://tools.ietf.org/html/rfc3626> (visitado 22-12-2020).
- [22] G. Pei, M. Gerla y T.-W. Chen, "Fisheye state routing: a routing scheme for ad hoc wireless networks", en *2000 IEEE International Conference on Communications. ICC 2000. Global Convergence Through Communications. Conference Record*, New Orleans, LA, USA: IEEE, 2000. DOI: 10.1109/ICC.2000.853066.
- [23] S. Basagni, I. Chlamtac, V. Syrotiuk y B. Woodward, "A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)", en *MobiCom '98: Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, Dallas Texas USA: ACM, 1998, págs. 76-84. DOI: <https://doi.org/10.1145/288235.288254>. dirección: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/288235.288254>.
- [24] C. Perkins y P. Bhagwat, "Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers", en *SIGCOMM '94: Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications*, ACM, 1994, págs. 234-244. DOI: <https://doi.org/10.1145/190314.190336>. dirección: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/190314.190336>.
- [25] C. Santivañez y R. Ramanathan, "Hazy Sighted Link State (HSLs) Routing: A Scalable Link State Algorithm", BBN Technologies, inf. téc., 2001. DOI: 10.13140/RG.2.2.10808.03844. dirección: https://www.researchgate.net/publication/323689110%7B%5C_%7DHazy%7B%5C_%7DSighted%7B%5C_%7DLink%7B%5C_%7D

7B%5C_%7DState%7B%5C_%7DHSL%7B%5C_%7DRouting%7B%5C_%7DA%7B%5C_%7DScalable%7B%5C_%7DLink%7B%5C_%7DState%7B%5C_%7DAlgorithm.

- [26] A. Neumann, C. Aichele, M. Lindner y S. Wunderlich, *Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking (B.A.T.M.A.N.)* 2008. dirección: <https://tools.ietf.org/html/draft-wunderlich-openmesh-manet-routing-00> (visitado 31-07-2020).
- [27] D. Johnson, D. Maltz e Y.-C. Hu, *The Dynamic Source Routing Protocol (DSR)*, 2007. dirección: <https://tools.ietf.org/html/rfc4728> (visitado 31-07-2020).
- [28] C. Perkins, E. Belding-Royer y S. Das, *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, 2003. dirección: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561> (visitado 31-07-2020).
- [29] Z. Haas, M. R. Pearlman y P. Samar, *The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks*, 2002. dirección: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-zone-zrp-04> (visitado 31-07-2020).
- [30] V. Park y M. S. Corson, *Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1*, 2001. dirección: <https://tools.ietf.org/id/draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt> (visitado 31-07-2020).
- [31] S. Rosati, K. Kruzelecki y L. Traynard, "Speed-aware routing for UAV ad-hoc networks", en *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Atlanta: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2013.6825185.
- [32] Y. Zheng, Y. Wang, Z. Li, L. Dong, Y. Jiang y H. Zhang, "A Mobility and Load aware OLSR routing protocol for UAV mobile ad-hoc networks", en *2014 International Conference on Information and Communications Technologies (ICT 2014)*, Nanjing, China: IET, 2014. DOI: 10.1049/cp.2014.0575.

- [33] C. Pu, "Link-Quality and Traffic-Load Aware Routing for UAV Ad Hoc Networks", en *2018 IEEE 4th International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC)*, Philadelphia: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/CIC.2018.00-38.
- [34] M. Song, J. Liu y S. Yang, "A Mobility Prediction and Delay Prediction Routing Protocol for UAV Networks", en *2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Hangzhou, China: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/WCSP.2018.8555927.
- [35] S. Y. Dong, "Optimization of OLSR routing protocol in UAV ad HOC network", en *2016 13th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, Chengdu, China: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ICCWAMTIP.2016.8079811.
- [36] T. Sakano, S. Kotabe, T. Komukai, T. Kumagai, Y. Shimizu, A. Takahara y T. Ngo, "Bringing movable and deployable networks to disaster areas: development and field test of MDRU", *IEEE Network*, vol. 30, n.º 1, págs. 86-91, 2016. DOI: 10.1109/MNET.2016.7389836. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7389836/>.
- [37] M. Erdelj, E. Natalizio, K. Chowdhury e I. Akyildiz, "Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management", *IEEE Pervasive Computing*, vol. 16, n.º 1, págs. 24-32, 2017. DOI: 10.1109/MPRV.2017.11. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7807176/>.
- [38] N. Zhao, W. Lu, M. Sheng, Y. Chen y J. Tang, "UAV-Assisted Emergency Networks in Disasters", *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, n.º 1, págs. 45-51, 2019. DOI: 10.1109/MWC.2018.1800160. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8641424/>.
- [39] *OLSR.org*. dirección: <https://www.olsr.org> (visitado 19-12-2020).

Anexos



A. Marco Metodológico

Bases de datos consultadas y criterios de búsqueda:

Las principales bases de datos consultadas fueron de la IEEE, Scopus y Springer. El criterio de búsqueda se base en palabras clave filtrando normalmente por los últimos 5 años y ordenando, de ser posible, por cantidad de citas que haya tenido el trabajo.

Herramientas para la gestión de la bibliografía:

Gestores bibliográficos: Google Spreadsheets, Mendeley y Cmap Tools. Las primeras dos fueron utilizadas para llevar un registro de las fuentes consultadas. La herramienta de Cmap fue utilizada para organizar estas fuentes en un árbol de referencias agrupado por temas y resaltando las fuentes más importantes por su aporte. En la figura A.1 se muestra el árbol de referencias elaborado.

UAVs wireless networks' application to give support in emergency situations

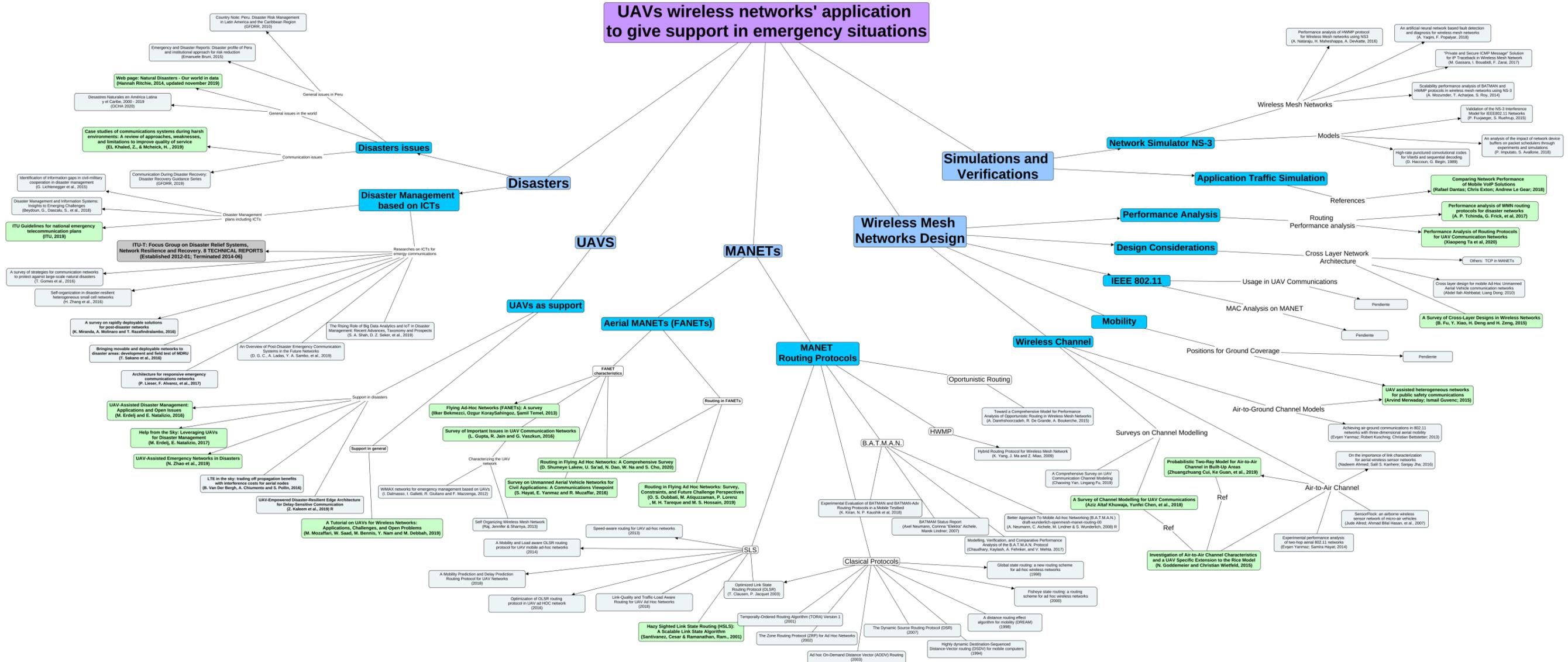


Figura A.1: Árbol de referencias

Elaboración propia.