

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias  
en Electrónica y Telecomunicaciones  
con orientación en Telecomunicaciones**

---

**Diseño de enlaces de radiocomunicación  
sobre sistemas de plataformas de gran altitud (HAPS)  
para aplicaciones en redes 5G**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Oswaldo Hernández Arrambide**

Ensenada, Baja California, México  
2025

Tesis defendida por  
**Oswaldo Hernández Arrambide**

y aprobada por el siguiente Comité

**Dr. Roberto Conte Galván**  
Codirector de tesis

**Dr. Jorge Enrique Preciado Velasco**  
Codirector de tesis

**Dr. Salvador Villarreal Reyes**

**Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza**

**Dr. Jorge Torres Rodríguez**



**Dra. María del Carmen Maya Sánchez**  
Coordinadora del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

**Dra. Ana Denise Re-Araujo**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Oswaldo Hernández Arrambide** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

**Diseño de enlaces de radiocomunicación sobre sistemas de plataformas de gran altitud (HAPS)  
para aplicaciones en redes 5G**

Resumen aprobado por:

**Dr. Roberto Conte Galván**  
Codirector de tesis

**Dr. Jorge Enrique Preciado Velasco**  
Codirector de tesis

Los Sistemas de Plataformas de Gran Altitud (del inglés *High Altitude Platform System*, HAPS) son sistemas aéreos diseñados para operar entre 17 km y 50 km de altitud que integran apartados de aeronáutica y comunicaciones inalámbricas con el propósito de brindar acceso a una red de datos. Esta tecnología permite ofrecer un sistema alternativo a las redes terrestres y satelitales, apoyando a las redes de telecomunicaciones existentes que se dañen o sobresaturen por la demanda. Los HAPS posibilitan la prestación del servicio semipermanente o temporal como parte de las redes de comunicaciones digitales 5G y en lo particular, destacan en el respaldo de brindar conectividad a zonas remotas o de difícil acceso, a una cobertura de hasta 420 km de diámetro. En la presente tesis se lleva a cabo un análisis de la tecnología HAPS como nodo central en las redes de comunicaciones no terrestres y en coexistencia de redes terrestres, con el propósito de brindar cobertura en situaciones adversas (como fenómenos hidrometeorológicos extremos). Esto aportaría en la provisión de servicios 5G en su forma como “Estación base del grupo Internacional de Telecomunicaciones Móviles 2020” o HIBS. La infraestructura aérea se complementará con redes inalámbricas, terrestres y satelitales; dando soporte al próximo ecosistema 6G. En este sentido, se consideran escenarios de redes basadas en plataformas aéreas semipermanentes, como apoyo rural y suburbano mediante HAPS para evaluar la viabilidad de las comunicaciones y esbozar los problemas de coexistencia con las redes existentes. Los escenarios se encuentran en el contexto de los estándares 5G, donde se obtuvieron los parámetros como potencia de transmisión, modulación, frecuencias asignadas, y otros elementos del sistema como son los teléfonos celulares, nodos repetidores, estaciones de interconexión y carga útil de la plataforma. Para estos escenarios se calculó la Relación de Portadora a Ruido o CNR (del inglés *Carrier to Noise Ratio*) de una serie de radioenlaces Tierra-Aire, Aire-Tierra y Aire-Aire, bajo la presunción de una serie de valores de QoS (latencia, velocidad de bits, ancho de banda, disponibilidad del canal) para distintas longitudes de enlace, con el objetivo de presentar propuestas de red en Baja California, México.

**Palabras clave: 5G, HAPS, HIBS, Redes No Terrestres, QoS, Radioenlaces, Latencia, Cobertura.**

Abstract of the thesis presented by **Oswaldo Hernández Arrambide** as a partial requirement to obtain the Master of science degree in Electronics and Telecommunications with Telecommunications orientation.

**Design of radio communication links over High-Altitude Platform systems (HAPS) for 5G network applications.**

Abstract approved by:

**Dr. Roberto Conte Galván**  
Thesis Co-director

**Dr. Jorge Enrique Preciado Velasco**  
Thesis Co-director

High Altitude Platform Systems (HAPS) are aerial systems designed to operate between 17 km and 50 km altitude that integrate aeronautical and wireless communications components to provide access to a data network. This technology provides an alternative system to terrestrial and satellite networks, supporting existing telecommunications networks that are damaged or oversaturated by demand. HAPS enables the provision of semi-permanent or temporary service as part of 5G digital communications networks and they stand out in supporting the provision of connectivity to remote or difficult to access areas, with a coverage of up to 420 km in diameter. In this thesis, an analysis of HAPS technology as a central node in non-terrestrial communication networks and in coexistence with terrestrial networks is carried out, with the purpose of providing coverage in adverse situations (such as extreme hydrometeorological phenomena). This would contribute to the provision of 5G services in its form as a "Base Station of the International Mobile Telecommunications Group 2020" or HIBS. The airborne infrastructure will be complemented by wireless, terrestrial and satellite networks, supporting the upcoming 6G ecosystem. In this matter, scenarios of networks based on semi-permanent aerial platforms are considered, rural and suburban like support through HAPS to evaluate the viability of communications and outline the problems of coexistence with existing networks. The scenarios are in the context of 5G standards, where parameters such as transmission power, modulation, assigned frequencies, and other system elements such as cell phones, relay nodes, interconnection stations and platform payload were obtained. For these scenarios, the Carrier to Noise Ratio (CNR) of a series of ground-to-air, air-to-ground and air-to-air radio links was calculated, under the assumption of a series of QoS values (latency, bit rate, bandwidth, channel availability) for different link lengths, with the objective of presenting network proposals in Baja California, Mexico.

**Keywords: 5G, HAPS, HIBS, Non-Terrestrial Networks, QoS, Radio Links, Latency, Coverage.**

## Dedicatoria

*Para mi novia,*

*mi familia,*

*mentores,*

*amigos,*

*y*

*sobre todo a la humanidad.*

## **Agradecimientos**

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por su generoso apoyo económico que ha hecho posible la realización de mis estudios de posgrado. Asimismo, extiendo mi gratitud al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por haberme acogido y proporcionado las facilidades necesarias para llevar a cabo mis investigaciones.

A mis codirectores, el Dr. Roberto Conte y al Dr. Jorge Preciado, por su invaluable apoyo, orientación y paciencia a lo largo de este proceso académico.

A mis sinodales, el Dr. Salvador Villarreal, Dr. Marco Panduro y al Dr. Jorge Torres, por su valiosa contribución y recomendaciones que han enriquecido significativamente esta investigación.

A mis compañeros de la Rama Estudiantil IEEE y del Laboratorio de Telecomunicaciones y Tecnología Aeroespacial por apoyarme y compartir momentos fraternales.

Finalmente a mi familia, que aportaron en mi crecimiento y aprendizaje personal.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	x
Lista de tablas.....	xiii
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Metodología.....	5
<b>Capítulo 2. Marco teórico de HAPS en redes 5G.....</b>	<b>6</b>
2.1 Descripción del ambiente de operación.....	6
2.2 Características aeronáuticas de las plataformas.....	8
2.3 Clasificación de plataformas y subsistemas.....	9
2.3.1 Aerostatos.....	11
2.3.2 Aerodinos.....	12
2.3.3 Globos libres estratosféricos.....	13
2.4 Estado actual de plataformas aéreas.....	15
2.5 Situación actual de HAPS en redes 5G.....	18
2.5.1 Ecosistema 5G.....	19
2.5.2 Redes no terrestres.....	25

2.5.3	Redes integradas espacio – aire – tierra .....	28
2.6	Normatividad, regulaciones y estándares.....	30
2.6.1	Aspectos normativos de aeronáutica.....	31
2.6.2	Aspectos normativos de las comunicaciones.....	34
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Diseño de enlaces de radiofrecuencia sobre HAPS .....</b>	<b>36</b>
3.1	Elementos del sistema .....	36
3.1.1	Equipo de usuario.....	38
3.1.2	Estación base como nodo repetidor .....	39
3.1.3	Plataforma con acceso a la red .....	41
3.1.4	Gateway .....	43
3.2	Tipos de enlaces .....	45
3.2.1	Enlace de servicio .....	45
3.2.2	Enlaces inter-plataforma .....	45
3.2.3	Enlace de pasarela ( <i>backhaul</i> ).....	46
3.3	Modelo de canal HAPS .....	47
3.3.1	Modelo de propagación en el espacio libre .....	47
3.4	Antenas en los elementos .....	48
3.5	Pérdidas por atenuación en los enlaces.....	50
3.5.1	Pérdidas por implementación .....	50
3.5.2	Pérdidas por borde de cobertura .....	51
3.5.3	Pérdidas por gases atmosféricos.....	51
3.5.4	Pérdidas por lluvia.....	53
3.5.5	Pérdidas por trayectoria.....	55
3.6	Parámetros de calidad del servicio .....	55
3.6.1	Latencia .....	56
3.6.2	Velocidad de bits .....	56
3.6.3	Ancho de banda.....	58

3.6.4	Disponibilidad.....	59
3.6.5	Calidad del canal.....	59
<b>Capítulo 4. Casos de estudio y análisis de cobertura, latencia y enlaces del sistema .....</b>		<b>61</b>
4.1	Despliegues de red 5G sobre HAPS.....	61
4.1.1	Caso de estudio 1 – Servicio directo a dispositivos.....	62
4.1.2	Caso de estudio 2 – Arquitectura de múltiples saltos.....	63
4.1.3	Caso de estudio 3 – Servicio directo a dispositivos con enlace inter-plataforma.....	64
4.1.4	Caso de estudio 4 – Arquitectura de múltiples saltos con enlace inter-plataforma.....	65
4.2	Herramienta de cálculo para presupuestos de enlaces HAPS .....	66
4.3	Cobertura .....	67
4.3.1	Modelo de cobertura .....	67
4.3.2	Cálculo de cobertura .....	68
4.4	Latencia .....	69
4.4.1	Modelo de latencia por propagación .....	70
4.4.2	Cálculo de latencia para los despliegues.....	70
4.5	Factores para presupuesto de enlaces.....	72
4.5.1	Modulación y ancho de banda .....	72
4.5.2	Elementos y sus parámetros .....	74
4.5.3	Ganancia y PIRE .....	74
4.5.4	Presupuesto de enlace .....	75
4.5.5	Escenarios.....	76
4.6	Análisis de resultados.....	78
4.6.1	Análisis de cobertura.....	78
4.6.2	Análisis de retardo.....	80
4.6.3	Análisis de CNR.....	81
4.7	Propuesta de red sobre HAPS .....	83
<b>Capítulo 5. Conclusiones, contribuciones y trabajo a futuro.....</b>		<b>88</b>

5.1	Conclusiones.....	88
5.2	Contribuciones .....	90
5.3	Desafíos por superar .....	91
5.4	Trabajo futuro .....	92
	<b>Literatura citada .....</b>	<b>93</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>99</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Gráfico de variación de la temperatura atmosférica media en relación con la altitud de la atmósfera estándar (Pidwirny et al., 2021). .....	7
2. Perfil típico del viento en la estratósfera basado en datos de observación de la NASA (Grace & Mohorcic, 2010). .....	7
3. Diagrama de cuerpo libre en globos bajo el “ <i>principio de flotabilidad</i> ”. La fuerza de “ <i>empuje por flotabilidad</i> ” está directamente relacionada con el volumen del gas de flotabilidad, mientras que el “ <i>peso</i> ” es el producto de la suma de las fuerzas de gravedad y masa total del vehículo (Leishman, 2023). .....	8
4. Diagrama de cuerpo libre sobre un perfil alar. El “ <i>centro de presiones</i> ” es el punto donde actúan la fuerza resultante de la “ <i>diferencia de presiones</i> ” y la “ <i>fuerza de arrastre</i> ”, mientras que las “ <i>líneas de flujo</i> ” marcan la dirección del fluido en el plano (Leishman, 2023). .....	9
5. Principales componentes de un aerostato rígido. El diagrama muestra componentes esenciales para la aeronave de manera simple, están compuestos por subsistemas que varían de un modelo a otro. ....	12
6. Solar Impulse (VOA News, 2015). .....	13
7. Componentes de un globo libre estratosférico (Leishman, 2023). .....	14
8. Modelo prototipo Stagger SHARP (del inglés <i>Stationary High Altitude Relay Platform</i> ). Recargado por baterías voló a una altitud de 50 m, también logró transmitir a la frecuencia de 2.5 GHz (Jull, 1985). .....	16
9. El proyecto <i>Loon</i> , exitosamente realizó comunicaciones aire-aire con una velocidad de datos de 0.15 Gbps (X Company, 2024). .....	17
10. Casos de uso, aplicaciones y escenarios de la IMT-2020 por la UIT-R (2015). .....	20
11. Diagrama radial de las capacidades fundamentales para los tres distintos casos de uso propuestos en la IMT-2020 por la UIT-R (2015). .....	21
12. Esquema de la arquitectura jerárquica de una red integrada aire-tierra propuesta por Qiu et al. (2019). .....	27
13. Arquitectura de acceso directo por NTN, donde la plataforma cuenta con una carga útil “ <i>transparente</i> ” a bordo (ETSI, 2023). .....	27
14. Arquitectura de enlace de pasarela por NTN, donde la plataforma cuenta con una carga útil “ <i>regenerativa</i> ” a bordo (ETSI, 2023). .....	27
15. Clasificación de redes según altitudes de acuerdo con los enfoques propuestos en la literatura. ....	30

16. Mapa de rutas aéreas comerciales del aeropuerto de Tijuana. Se observa una condensación de las rutas debido a la posición geográfica de la ciudad situada en el extremo noroeste del país (nextSvg, 2024). .....	33
17. Haces de radiación de un dispositivo inteligente con antenas para ondas milimétricas, (a) vista frontal, (b) vista lateral. ....	39
18. Estación base contemporánea para red 5G (Agrawal, 2018). ....	41
19. Interpretación de configuración de haz a bordo de plataforma con un arreglo de antenas. ....	42
20. Antena parabólica con polarización doble de alto rendimiento de frecuencias 5.85-7.2GHz, con aplicación de <i>gateway</i> para enlaces de pasarela y, a su vez con la función de 2x2 MIMO (Sanny Telecom, 2024). ....	44
21. Patrón de radiación de un arreglo lineal de 8 elementos.....	49
22. Patrón de radiación de un arreglo lineal de 16 elementos.....	49
23. Gráfica de atenuación por gases atmosféricos (Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2007). .....	52
24. Lluvia acumulada promedio anual (Comisión Nacional del Agua, 2010).....	53
25. Regiones de precipitación pluvial en México (Conte Galván, 2020).....	54
26. Topología para el caso de servicio directo a dispositivos. ....	63
27. Topología para el caso de múltiples saltos. ....	64
28. Topología para el caso de servicio directo a dispositivos con enlace inter-plataforma. ....	65
29. Topología para el caso de múltiples saltos con enlace inter-plataforma. ....	66
30. Imagen comparativa de cobertura a 20° en 17 km (azul), 20 km (rojo) y 22 km (negro) de altitud. ....	78
31. Imagen comparativa de cobertura a 20° en 20 km (rojo) y 50 km (azul) de altitud.....	79
32. Gráfica de resultados de cálculos de cobertura. ....	79
33. Resultados de latencia en un sentido para los casos de estudio.....	80
34. Comparación de todos los casos en escenarios del 1 al 8. ....	81
35. Comparación de todos los casos en escenarios del 9 al 16. ....	82
36. Propuesta de red HAPS #1. Con 3 plataformas repartidas en la zona norte del estado de Baja California, de acuerdo con la cobertura propuesta en los casos de estudio.....	83
37. Imagen satelital de zonas rurales en los alrededores de Mexicali. ....	84

38. Propuesta de red HAPS #2. Con 5 plataformas repartidas en la zona norte del estado de Baja California, de acuerdo con la cobertura propuesta en los casos de estudio..... 85
39. Propuesta de red HAPS #3. Con 5 plataformas repartidas en la zona norte y sur del estado de Baja California, de acuerdo con la cobertura propuesta en los casos de estudio. .... 86

## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Comparativa de las capacidades entre plataformas que componen la red SAGIN (Alam et al., 2021; GSMA, 2022; Lin et al., 2021; Xiao et al., 2022).....	29
2. Asignación de frecuencias por la CMR-23 (Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2023).....	34
3. Descripción de dispositivos 5G. ....	39
4. Descripción de nodo repetidor 5G.....	41
5. Descripción de plataforma aérea.....	43
6. Descripción de <i>Gateway</i> . ....	44
7. Pérdidas por implementación por elemento.....	50
8. Tasas pluviales de las regiones en México.....	54
9. Retardos mínimos, máximos y de extremo a extremo para distintas plataformas. Extraído de (ETSI, 2025a; Sun & Giambene, 2024) .....	56
10. KPI para distintos escenarios. Extraída de (ETSI, 2025a). ....	57
11. Ancho de banda de acuerdo con la banda de frecuencia.....	58
12. Comparación de indicadores de calidad de señal para redes terrestres.....	59
13. Zonas de cobertura recomendadas por la UIT-R (2000).....	67
14. Comparativa de resultados de altitudes con diferentes ángulos de elevación, se muestra diámetro de cobertura, distancia máxima de enlace y área total cubierta.....	69
15. Resultados de latencia para el caso de estudio 1. ....	70
16. Resultados de latencia para el caso de estudio 2. ....	71
17. Resultados de latencia para el caso de estudio 3. ....	71
18. Resultados de latencia para el caso de estudio 4. ....	71
19. Eficiencia espectral de modulaciones utilizadas.....	73
20. Resultados de ancho de banda de ruido de acuerdo con la modulación y velocidad de bits. ....	73
21. Parámetros iniciales para cada elemento del despliegue. ....	74
22. Ganancias y PIRE de los elementos del despliegue. ....	75

23. Configuración de escenarios expuestos en cada caso de estudio.....	77
24. Resultados de CNR Total en los escenarios para cada caso.....	77

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Antecedentes

México tiene una extensión de casi 2 millones de kilómetros cuadrados que se extiende desde el norte vasto y desértico, hasta el sur húmedo y tropical, pasando por sierras y cordilleras montañosas, siendo rico en todo tipo de climas y regiones naturales. Su posición geográfica lo expone a diversos fenómenos naturales de alto riesgo para la población, tales como inundaciones, sismos y huracanes, entre otros. Por lo que, las instituciones gubernamentales tienen la necesidad de afrontar los peligros que representan los desastres, así surgió el uso de la tecnología y programas de protección civil que apoyan reduciendo riesgos que afectan a la ciudadanía y sus bienes materiales, previo, durante y después del evento.

La tecnología móvil habilitada por comunicaciones inalámbricas es esencial en la organización de bomberos, médicos, policías, militares y otro personal de socorro, así como voluntarios y población en general. Esta tecnología contribuye a mantener el orden y a proteger vidas, especialmente en las zonas más vulnerables. Bajo este contexto se ha propuesto utilizar la infraestructura de Telecomunicaciones Móviles Internacionales del 2020 (por sus siglas en inglés IMT-2020 (*International Mobile Telecommunications-2020*)), para brindar servicio de comunicaciones en zonas urbanas, suburbanas, rurales y remotas donde padecen de una conectividad deficiente o nula.

Continuando con los antecedentes de la infraestructura IMT-2020, el ecosistema de Quinta Generación, conocido como 5G (por sus siglas en inglés *Fifth Generation*), se destaca por su relevancia en todos los ámbitos de las comunicaciones móviles. Este está compuesto por múltiples sistemas innovadores que permiten la transferencia de información a través de redes de comunicaciones 5G y 4G. Dado que la comunicación es vital para afrontar “*eventos de emergencia*”, tanto las redes terrestres como las redes espaciales o aéreas pueden proveer de comunicaciones móviles mediante radioenlaces.

Se ha propuesto recientemente utilizar vehículos aéreos como componente principal en las redes de comunicaciones móviles con tecnología 5G. Siendo un derivado de las redes inalámbricas terrestres que se caracterizan por su alta velocidad, baja latencia y mínimas pérdidas en la potencia de la señal de radio, sin embargo, su cobertura se limita a áreas pequeñas. Las redes satelitales en cambio ofrecen una amplia cobertura, pero enfrentan significativas pérdidas de potencia y un considerable tiempo de retardo

(latencia). El uso de vehículos aéreos pilotados de manera remota y autónomos como los drones, se presenta como una plataforma intermedia para la IMT-2020. Estos vehículos logran una baja latencia y menores pérdidas en la señal en comparación con las redes espaciales, al tiempo que ofrecen una mayor área de cobertura en comparación con las redes terrestres.

Los radioenlaces se ven principalmente afectados por fenómenos hidrometeorológicos, como la lluvia y la nieve, cuya intensidad y magnitud determinan su impacto. En situaciones de desastres naturales, estos fenómenos pueden causar interrupciones o caídas en las redes de comunicación. El impacto negativo de los hidrometeoros en los enlaces de comunicaciones depende directamente de la región geográfica y climatológica donde se realizan. Por lo tanto, es crucial definir el ambiente de propagación, así como el área de cobertura de los radioenlaces. Las redes aéreas son fundamentales para el futuro de las IMT-2020 debido a su resistencia a factores ambientales extremos. En contraste, las estaciones base de las redes terrestres son más vulnerables a estos factores, lo que disminuye su desempeño.

Motivado por lo anterior, a lo largo de este trabajo se crearán escenarios hipotéticos con el fin de calcular el desempeño de radioenlaces para redes tierra – aire – tierra, para después presentar y analizar propuestas que utilicen tecnología 5G sobre plataformas aéreas. Los Sistemas de Plataformas de Gran Altitud o HAPS (por sus siglas en inglés, *High Altitude Platforms Systems*) comienzan en los años 1990s (D'Oliveira et al., 2016) y su uso como estaciones base como parte de las redes de IMT-2020 conocidas como HIBS (del inglés *HAPS as IMT Base Station*) asignadas en bandas para servicios móviles. Sin embargo, ahora han cobrado mayor relevancia en la nueva generación de redes para servicios móviles, siendo una parte esencial de la infraestructura interoperable entre Redes Terrestres (*Terrestrial Networks, TN*) y Redes No-Terrestres (*Non-Terrestrial Networks, NTN*).

De acuerdo con los estándares actuales y propuestos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y el Proyecto Asociación de Tercera Generación (*3rd Generation Partnership Project, 3GPP*), la coexistencia entre TN y NTN requiere atenderse con métodos y tecnologías innovadoras capaces de mantener la infraestructura unida y sincronizada, lo que involucra problemas diferentes a los ya vistos en los enlaces tierra-tierra. Los radioenlaces espacio–tierra–espacio son capaces de enlazar comunicaciones directo a dispositivos como celulares, módems, enrutadores o sensores. De esta misma idea, es necesario averiguar el comportamiento de los radioenlaces aire–tierra–aire y desempeño ante situaciones adversas en regiones mexicanas.

La Relación de Portadora a Ruido o *Carrier-to-Noise Ratio* (CNR) es un indicador clave del desempeño de las redes de comunicaciones inalámbricas. Este se ve afectado por la atenuación atmosférica y la atenuación por lluvia, entre otros factores, que dependen de la distancia entre extremos, la potencia de transmisión y recepción, la frecuencia de operación y el ancho de banda del enlace, entre otros. La iniciativa de utilizar tecnología aeroespacial en redes aéreas contribuye al desarrollo de la infraestructura IMT-2020 de México, adaptándose al nuevo ecosistema emergente para el progreso de la sociedad mexicana. Con este propósito, este trabajo de tesis describe el contexto tecnológico de las NTN que México debe implementar para evolucionar su infraestructura de telecomunicaciones y apoyar las redes de comunicaciones en regiones afectadas por desastres naturales.

## 1.2 Planteamiento del problema

México es un país con un área de 1,960,646.7 km<sup>2</sup> y con 184,295 localidades rurales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020). Muchas de estas localidades son remotas, lo que complica la tarea de proporcionar y garantizar el derecho a la conectividad en toda la nación. México también está expuesto a riesgos naturales tales como terremotos, tsunamis, huracanes, incendios forestales o inundaciones, que figuran como un peligro común todo el tiempo. Además, el factor del cambio climático predice que el promedio de la temperatura cercana a la superficie aumente entre 1.1 – 1.9 °C en los próximos 4 años, según el reporte *Global Annual to Decadal Climate Update* (2024) de la Organización Mundial Meteorológica (OMM).

Esto provoca un aumento de fenómenos que causan desastres naturales en México, con consecuencias cada vez más graves según la tendencia actual. Por lo tanto, es prioritario proteger la vida y los bienes materiales de los ciudadanos para todos los niveles del gobierno mexicano. Es crucial actualizar la infraestructura nacional alineada con las nuevas tecnologías de comunicaciones inalámbricas, ya que desempeñan un papel vital en salvar vidas y facilitar la logística en actividades como las de Protección Civil (Instituto Federal de Telecomunicaciones, 2018).

Existen sistemas terrestres móviles y fijos resilientes a desastres, pero pueden verse limitados por los daños y obstáculos en el terreno de la zona afectada, entorpeciendo su despliegue sin lograr el alcance planeado. Si bien un método que se utiliza como alternativa suelen ser las redes espaciales, estas tienen desventajas como el tener un costo económico muy elevado. Las redes aéreas comparten características tanto de las redes espaciales como de las terrestres, sirviendo de complemento con el servicio móvil 5G

en la atención de eventos de emergencia. Considerando el entusiasmo que existe con las redes aéreas sobre HAPS y su uso en el ecosistema de 5G, se generan las siguientes interrogantes en contexto de su implementación en la infraestructura de México:

- ¿Cuáles son las diferencias tecnológicas entre una red terrestre, aérea y espacial desplegada en México?
- ¿Qué efecto tienen las condiciones climáticas pluviales extremas en los radioenlaces tierra–aire sobre HAPS en frecuencias asignadas por estándares 5G?
- ¿Es posible una conexión directa a dispositivos celulares utilizando HAPS como una estación base? Si es así, ¿los radioenlaces podrán satisfacer a los servicios de telefonía móvil bajo clima adverso presentado en regiones mexicanas?

El Foro Económico Mundial (2024) destacó esta tecnología emergente como una de las más importantes del año 2024. Se prevé que será el punto de partida para las comunicaciones de la siguiente generación debido a sus capacidades y flexibilidad. Existe la preocupación de las autoridades en las posibles afectaciones de sus comunicaciones en las localidades del país que se encuentren sufriendo situaciones adversas o se encuentren en zonas remotas, apoyado por lo mencionado, HAPS es un enfoque alcanzable para acatar el problema.

### **1.3 Objetivos**

Bajo las interrogantes antes mencionadas, se redactaron los objetivos a responder. El objetivo general y cuatro objetivos específicos que puedan fundamentar las respuestas bajo el método científico.

#### **1.3.1 Objetivo general**

Desarrollar un marco de referencia para diseñar y analizar una red aérea de comunicaciones sobre HAPS, acorde a la visión de 5G. Esto incluye calcular coberturas y latencias por propagación, así como analizar los radioenlaces con base a sus índices de calidad en escenarios hipotéticos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Para lograr lo anterior se lleva a cabo lo siguiente:

- Describir la tecnología HAPS.
- Diseñar una red interoperable terrestre–aérea de comunicaciones inalámbricas.
- Calcular y analizar diferentes coberturas y latencias por propagación de la red.
- Calcular y analizar los diferentes tipos de radioenlaces de los escenarios a evaluar.

## 1.4 Metodología

En esta sección se presentan los pasos perpetuados para la elaboración de este trabajo y obtención de los resultados, los cuales son:

- Revisión de literatura y estado del arte de las tecnologías emergentes HAPS, ecosistema 5G y su relación con las redes no terrestres.
- Investigación de HAPS en su estado actual, su impacto en la estructura de las NTN y en las comunicaciones inalámbricas en México.
- Análisis de los parámetros de diseño y operación de redes aéreas identificando sus características.
- Evaluación de parámetros de enlaces tierra–aire y aire–aire.
- Diseño de radioenlaces para comunicaciones inalámbricas entre plataformas aéreas y estaciones base terrenas, junto con radioenlaces entre plataformas aéreas.
- Cálculo numérico utilizando el programa Excel de coberturas a distintos ángulos de elevación, latencia por propagación dada una cobertura y radioenlaces bajo distintas condiciones.
- Creación de cuatro casos de estudio con distintas topologías a ser evaluadas bajo distintos escenarios.
- Evaluación de 4 casos de estudio en 16 escenarios presentando tanto, su peor como su mejor caso en distintas regiones pluviales mexicanas.
- Comparación y análisis de resultados de los escenarios evaluados.
- Creación de propuestas de redes aéreas sobre HAPS en su formato HIBS, considerando el estado de Baja California como caso de estudio.

## Capítulo 2. Marco teórico de HAPS en redes 5G

---

Para contextualizar este trabajo, se describe el ambiente operativo de los HAPS, su clasificación, subsistemas y características aeronáuticas. También se incluye una sección que explica el estado actual y las generalidades de las plataformas en la red 5G. Las redes HAPS, que forman parte de las NTN junto con las TN dentro de la visión global de la 3GPP, lo cual refuerza y aumenta las capacidades de la infraestructura inalámbrica de las telecomunicaciones globales.

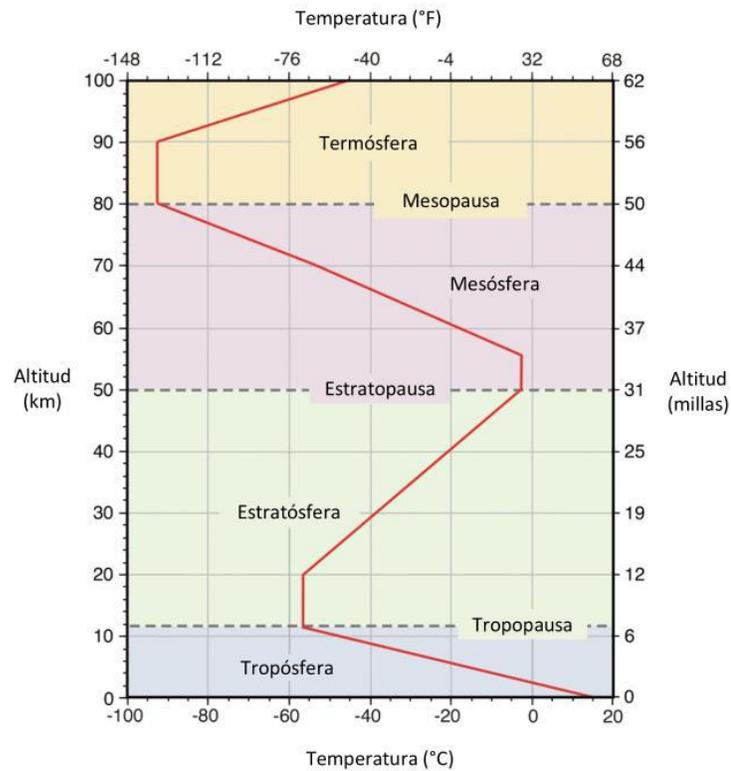
Aprovechando las diferencias tecnológicas entre las plataformas de NTN y TN, los HAPS pueden satisfacer algunos de los requerimientos establecidos por la IMT-2020. Es importante destacar que la literatura aborda las plataformas aéreas y satelitales bajo un mismo enfoque, cumpliendo con los requisitos y parámetros de una red 5G. El marco de referencia de este trabajo se construyó utilizando información pública y libre disponible en Internet, así como artículos científicos, libros y reportes técnicos de instituciones especializadas en NTN y HAPS.

### 2.1 Descripción del ambiente de operación

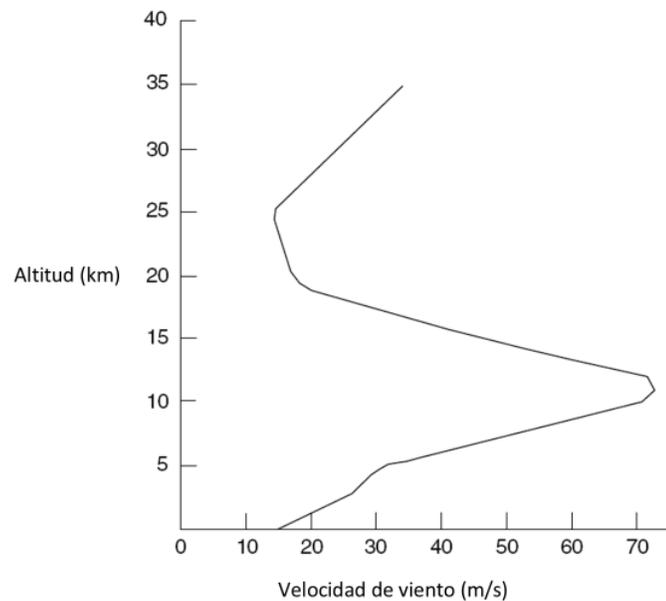
En este subtema se abordará el ambiente de operación de la plataforma para contextualizar los retos ambientales. Las propiedades ambientales de las capas atmosféricas dependen de múltiples factores, como la temperatura, presión, velocidad, densidad y composición molecular del aire, que está formada principalmente por moléculas de nitrógeno y oxígeno, además de otros elementos. De acuerdo con la Figura 1, se observan las diversas condiciones atmosféricas a diferentes altitudes, en relación con la temperatura y la velocidad del viento en cada capa, donde las "*pausas*" indican transiciones entre distintas capas atmosféricas. Debido a su altitud (17-25 km), los HAPS se ubican en la estratósfera, la capa superior de la atmósfera. Las condiciones en la estratósfera son diferentes a las de la tropósfera, lo que permite que las aerolíneas comerciales operen a altitudes de crucero (~11 km).

En cuanto a la velocidad del aire, la Figura 2 muestra que, entre 18 y 25 km de altitud, la velocidad del viento atmosférico es mínima. Esta condición puede favorecer a las aeronaves más ligeras que el aire, las cuales experimentan el "*efecto vela*" que ocurre cuando una superficie es impactada por corrientes de aire, creando resistencia y dificultades para maniobrar. Por lo tanto, entre mayor sea la velocidad del

viento, mayor control de la aeronave para contrarrestar este fenómeno será requerido, y a su vez de más instrumentos de control para mantenerse en un punto del espacio.



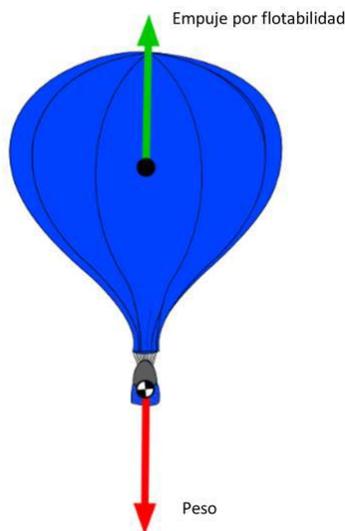
**Figura 1** Gráfico de variación de la temperatura atmosférica media en relación con la altitud de la atmósfera estándar (Pidwirny et al., 2021).



**Figura 2** Perfil típico del viento en la estratósfera basado en datos de observación de la NASA (Grace & Mohorcic, 2010).

## 2.2 Características aeronáuticas de las plataformas

Para controlar un vehículo aéreo, ya sea una aeronave, avión, helicóptero, planeador o globo, es esencial comprender los principios físicos del vuelo y aprender a utilizar o contrarrestar estas fuerzas naturales. Es fundamental revisar de manera general y resumida los principios aeronáuticos que afectan a las plataformas. Entender las capacidades de cada plataforma permite tomar decisiones más acertadas en el diseño de radioenlaces para redes aéreas y anticipar los posibles escenarios que puedan surgir. Este subtema describirá las fuerzas físicas que enfrentan los tipos de plataforma.

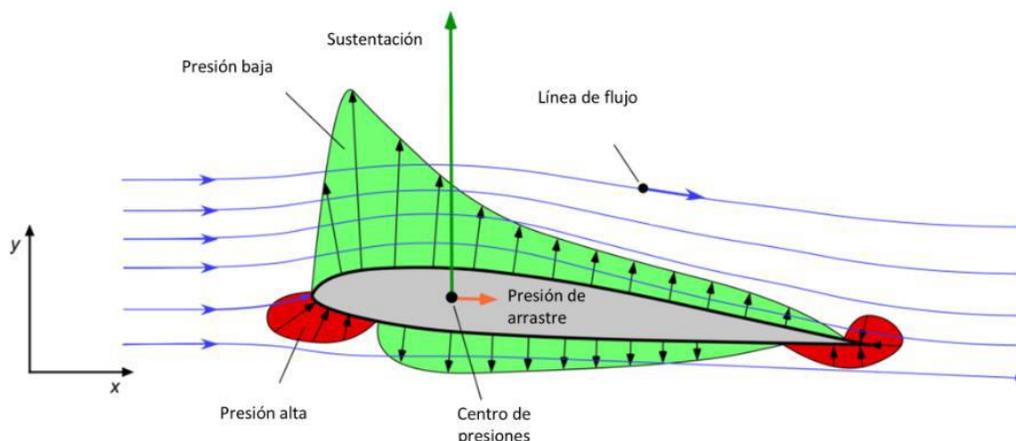


**Figura 3** Diagrama de cuerpo libre en globos bajo el “principio de flotabilidad”. La fuerza de “empuje por flotabilidad” está directamente relacionada con el volumen del gas de flotabilidad, mientras que el “peso” es el producto de la suma de las fuerzas de gravedad y masa total del vehículo (Leishman, 2023).

Uno de los métodos para elevarse en el aire usa el “principio de flotabilidad” o “principio de arquímedes”, se utiliza para analizar las fuerzas aerostáticas en plataformas más ligeras que el aire, y establece que *la fuerza ascendente o de flotación ejercida sobre un cuerpo sumergido en un fluido es igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo, siempre que el cuerpo esté total o parcialmente sumergido, y es independiente a la geometría de éste*. Este principio de análisis hidrostático o aerostático se utiliza en todos aquellos considerados cuerpos flotantes, como barcos, submarinos, dirigibles y globos (Leishman, 2023).

En la Figura 3 se puede observar los vectores fuerza aplicados al vehículo, de manera simple, se observan las dos principales fuerzas que actúan, siendo estas el “empuje” y el “peso”. Es importante mencionar que falta considerar en la figura la fuerza de “arrastre”. Las plataformas más ligeras que el aire con geometría típica de “globo” tienden a sufrir el “efecto vela”, este se ve representado como un aumento en la

magnitud del “arrastre”. El efecto se refiere a la influencia que el viento y las corrientes de aire tienen sobre el movimiento del globo, dicho de otra manera, el globo se mueve similar a la vela de un barco.



**Figura 4** Diagrama de cuerpo libre sobre un perfil alar. El “centro de presiones” es el punto donde actúan la fuerza resultante de la “diferencia de presiones” y la “fuerza de arrastre”, mientras que las “líneas de flujo” marcan la dirección del fluido en el plano (Leishman, 2023).

La Figura 4 muestra un segundo enfoque de análisis que explica la “sustentación” en un “perfil alar” que se estudia bajo la aplicación de las leyes de Newton y el “Principio de Bernoulli”. La “sustentabilidad” depende de los siguientes atributos: “diferencias de presión”, “ángulo de ataque del perfil”, “forma aerodinámica del perfil”, “velocidad y densidad del aire” y “capa límite y resistencia del perfil”. Sin embargo, existe la “fuerza de arrastre” que va a favor de la dirección del aire, lo que detiene al aerodino, además de la “fuerza de gravedad” que lo jala hacia la tierra.

Estas fuerzas son vencidas con diferentes métodos, por mencionar algunos se tiene al diseño de la geometría, la capacidad de propulsión o distribución de peso de la aeronave. También, se implementan secciones alrededor de la aeronave para controlarla en los ejes del espacio, estos vienen en formato de “alerones, timón, aletas” etcétera. En resumen, se necesita una forma geométrica adecuada y velocidad para que exista sustentación, para mantener el control del aerodino se utilizan secciones móviles ubicadas por todo el fuselaje (Leishman, 2023).

### 2.3 Clasificación de plataformas y subsistemas

Este trabajo define a HAPS como: “un sistema aéreo que integra apartados de aeronáutica y comunicaciones inalámbricas con el propósito de brindar acceso a una red de datos”, con la capacidad de

realizar vuelos estratosféricos. Para hacerlo, el sistema unido por varios módulos realiza funciones como el control y maniobrabilidad en los tres ejes del espacio, recepción de comandos por telemetría, presurización y despresurización de gases (para el caso de aerostáticos y globos libres), posicionamiento geográfico, entre otras. A los HAPS se les denomina Estación de Plataforma de Gran Altitud del inglés *High Altitude Platform Station*, nombre que se refiere específicamente a aquellas plataformas con aplicaciones para servicios móviles, aunque cuando se trata de 5G se les asigna el acrónimo HIBS o HAPS como Estación Base de IMT-2020 (Euler et al., 2022).

En algunas ocasiones también se les conoce como Pseudo-Satélite de Gran Altitud, haciendo un énfasis en el uso como satélite, una vez más concordando con el acrónimo HAPS del inglés *High Altitude Pseudo-Satellite* (Hasan et al., 2020). Continuando con los términos utilizados en la literatura, la HAP (*High Altitude Platform*) o Plataforma de Gran Altitud, se refiere únicamente a la plataforma aérea y no al sistema completo que incluye la parte aeronáutica y de comunicaciones. Para fines generales de este trabajo de tesis, se denominará al HAPS como "*Sistema de Plataforma a Gran Altitud*" para mantener su definición flexible en sus funciones, y se clasificarán en diferentes categorías de acuerdo con su diseño aeronáutico: aerostatos, aerodinos y globos libres.

Los subsistemas de cada categoría no son muy diferentes entre sí (sin contar los de control y propulsión), y son dependientes de la aplicación, la cual dicta qué componentes electrónicos principales deberá llevar a bordo cada uno. La carga útil depende de la aplicación, por lo que para una misión de sondeo por imágenes remotas no sea la misma que para una misión de comunicaciones inalámbricas, pero sí pueden estar en la misma plataforma, haciéndola multipropósito. Este trabajo considera a la "*carga útil*" aplicada a telecomunicaciones como un sistema separado del sistema que es la plataforma aérea misma (HAPS Alliance, 2022), y es con esta misma idea que se lleva a cabo el diseño del despliegue, realizando la selección de la plataforma.

Los aerostatos pueden levantar cargas de hasta 500 kg, mientras que los aerodinos tienen una capacidad más limitada de alrededor de 150 kg dependiendo del diseño, junto con los globos libres, por lo que se recomienda tener en cuenta el tamaño y peso físico de la carga útil aplicado a IMT-2020, sin embargo, no se encuentra en la literatura un valor estándar o que ayude como referencia. Se profundiza en la descripción de los tipos de plataformas en los apartados siguientes.

### 2.3.1 Aerostatos

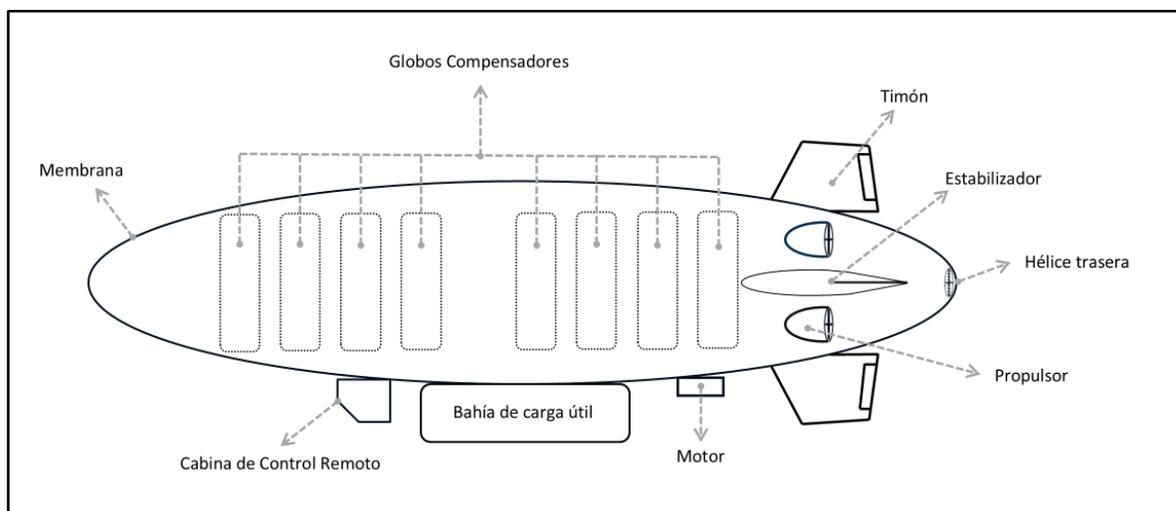
Las aeronaves tipo aerostato son aquellas que bajo el principio de flotabilidad pueden elevarse, siendo más ligeras que el aire junto con los globos libres, ya que utilizan un gas (como el Helio) con menor densidad que el aire para generar flotabilidad. La plataforma es reconocida por ser uno de los diseños pioneros en la aviación, con raíces en la historia antigua. Se caracteriza por usar métodos simples de control para su aeronavegabilidad, basados en la gestión de la diferencia de temperatura entre el aire y el gas de flotabilidad. La plataforma tiene una membrana que envuelve la estructura y la separa de la atmósfera. Utiliza globos compensadores para maniobrar y controlar su altitud, aumentando o disminuyendo su volumen. Además, cuenta con motores y estabilizadores por hélice que propulsan la aeronave y controlan sus diferentes ejes de orientación (Leishman, 2023).

El gas utilizado para generar flotabilidad en aerostatos suele ser el Helio (He), el cual es un gas noble difícil de conseguir naturalmente en la Tierra, pese a ser el segundo elemento más abundante en el universo. Otro gas popular es el hidrógeno (H), que tiene una densidad menor que el helio y, por lo tanto, es más efectivo en la tarea de generar flotabilidad. El hidrógeno fue ampliamente utilizado en aerostatos durante la primera mitad del siglo XX, pero su uso se suspendió por el miedo de accidentes fatales causados por su alta inflamabilidad y rápida ignición. Este gas es difícil de contener debido a su alta difusividad, lo que facilita su escape del globo compensador en mayor medida que el helio, lo que requiere de materiales compuestos capaces de mantenerlo contenido bajo presión.

El principio de operación de los aerostatos es mediante el manejo del gas que se encuentra dentro de los globos compensadores, ya que se puede aumentar y disminuir su volumen de manera controlada para elevar o bajar su altura de vuelo, respectivamente. De acuerdo con su estructura y construcción, los aerostatos pueden fabricarse de tres maneras: rígidos, semirrígidos, y dirigibles, que son los tipos de estructura que los conforman (Liao & Pasternak, 2009). La Figura 5 se realizó como ejemplo de los subsistemas de un aerostato rígido. La variación de volumen en los globos compensadores, junto con otros elementos de control, influye en la orientación de la aeronave en los tres ejes del espacio.

Esta aeronave se considera "*cuasi-estacionaria*", lo que significa que se encuentra en un punto fijo idealmente, pero en la práctica se encuentra desplazándose por un volumen cilíndrico con dimensiones generales de 1 km de diámetro por 1 km de altura. Esto requiere de un componente de posicionamiento para orientarse en el espacio aéreo, este puede ser por GNSS (del inglés *Global Navigation Satellite System*) u otro sistema similar. Las capacidades y aplicaciones de los aerostatos pueden compararse con las de un

satélite geoestacionario debido a su capacidad de mantenerse ancladas a un punto específico en el espacio. Sin embargo, operan a una altitud significativamente menor. Este es uno de los motivos que atraen a los autores para escoger este tipo de aeronave para el desarrollo de la infraestructura IMT-2020.



**Figura 5** Principales componentes de un aerostato rígido. El diagrama muestra componentes esenciales para la aeronave de manera simple, están compuestos por subsistemas que varían de un modelo a otro.

### 2.3.2 Aerodinós

Los aerodinós pueden ser tripulados, y también existe la posibilidad de que operen como naves autónomas no tripuladas (Organización de Aviación Civil Internacional, 2015). Una característica de los aerodinós tripulados es la presencia de pilotos que, después de cierto periodo de tiempo, requieren descansar, lo cual acorta la duración de las operaciones en vuelo impidiendo a las plataformas dar un servicio continuo por largos periodos. Aun así, se consideró que los aerodinós tripulados pueden apoyar en aplicaciones meteorológicas, científicas o militares en las etapas experimentales, según varias fuentes (Arum et al., 2020; D'Oliveira et al., 2016; Grace & Mohorcic, 2010; Tozer & Grace, 2001).

Aunque los HAPS actuales son controlados a distancia, se espera que en un futuro sean autónomos operados por *Inteligencia Artificial* (IA) con un nivel mínimo de supervisión humana, lo que asegura su correcto funcionamiento. Los aerodinós son aeronaves ultraligeras y aerodinámicamente eficientes, su diseño consiste en alas muy largas con una "relación de aspecto" eficiente, esto le permite vencer la gravedad estando en constante movimiento en contra del viento para no perder sustentabilidad. Lo último es crucial para mantener la altitud y el control de la plataforma, ya que los aerodinós no son estacionarios como los aerostatos (Leishman, 2023).

Esto presenta desafíos que requieren de técnicas multidisciplinarias para mantener una red de comunicaciones por radioenlaces operativa por tiempos prolongados y que además sea autónoma, lo que aumenta la complejidad en la coordinación de las plataformas. En la Figura 6 se puede observar el aerodino Solar Impulse, que fue capaz de dar la vuelta al mundo utilizando sólo energía solar, y siendo pilotado por un único piloto (VOA News, 2015). La posibilidad de mantener vuelos de larga duración propulsados por energía solar está confirmada, siendo un paso más hacia la sostenibilidad de las plataformas aéreas.

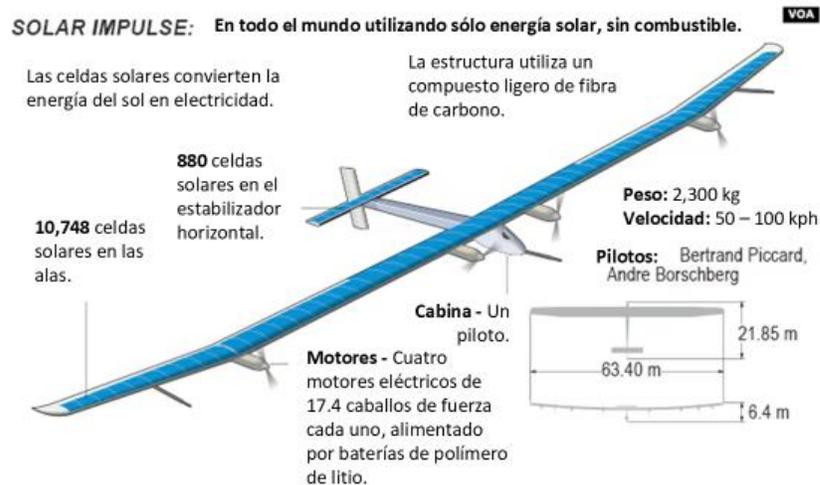


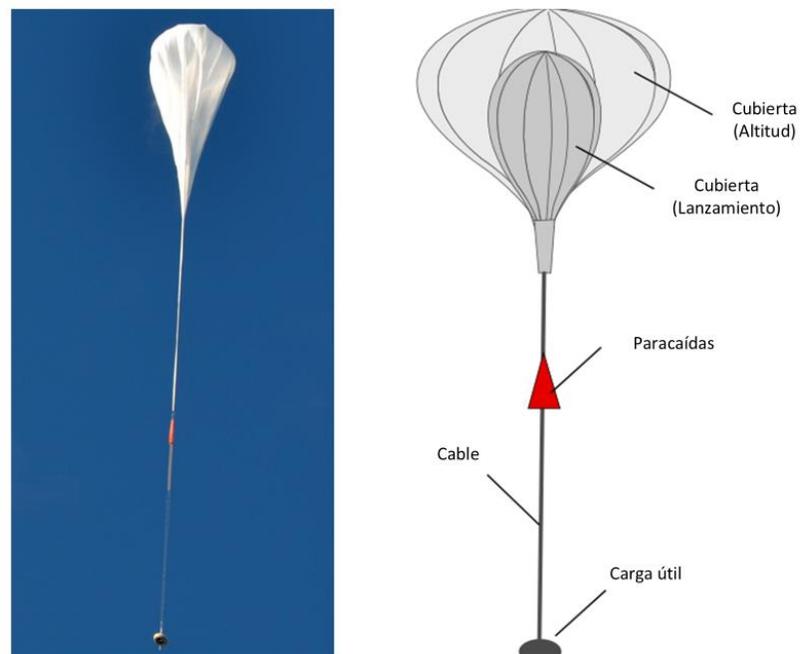
Figura 6 Solar Impulse (VOA News, 2015).

Solar Impulse cuenta con un sistema de propulsión de hélices sobre motores eléctricos, la energía solar adquirida por las fotoceldas durante el día recarga las baterías que impulsan a los motores. En su estructura se asume que los materiales utilizados están entre la fibra de vidrio y fibra de carbono, que son populares por sus propiedades de resistencia, flexibilidad y masa. Aunque todavía existen brechas de conocimiento en cuanto a los subsistemas y componentes específicos a bordo, se asegura que los aerodinos son capaces de viajar a altitudes de hasta 30 km y de operar en vuelo por semanas sin interrupción. Es importante mencionar que son muy sensibles en cuanto a la relación de peso referente a la carga útil, por lo que podrían estar limitados en comparación con los aerostatos.

### 2.3.3 Globos libres estratosféricos

El tercer tipo de plataforma utiliza igualmente el principio de flotabilidad para ascender a la altitud deseada. Los globos libres estratosféricos están diseñados para tener la capacidad de elevarse en el rango entre 15 y 50 km sobre la superficie, lo que es una altura muy alta para aeronaves comerciales, y muy baja

para satélites. A lo largo de su historia, los globos libres estratosféricos se han utilizado mayormente para el sondeo meteorológico, así como en experimentos de astronomía, química atmosférica y ciencias en general (Leishman, 2023). La plataforma se divide en dos tipos principales, “globos a presión cero” y “superpresión”, que son tipos de globos de gas ligero que se diferencian en la presión de gas que tienen dentro, donde ambos pueden llevar helio o hidrógeno como el gas para flotabilidad. Al elevarse, la plataforma eventualmente llegará al “techo de vuelo”, esto se refiere a la altitud máxima que puede alcanzar cualquier aeronave dependiendo de su “diseño”, “estructura”, “capacidad de presurización” y “densidad del aire”. En condiciones ideales, la altitud máxima se obtiene al observar la relación de “densidad del aire” con “altitud”, durante el ascenso del globo, la “densidad del gas de flotabilidad” será equivalente a la del aire en cierta altitud, marcando el techo de vuelo



**Figura 7** Componentes de un globo libre estratosférico (Leishman, 2023).

En la práctica se mantienen en operación por semanas o meses, con el estricto seguimiento de la ruta en tiempo real, se pretende disminuir riesgos para la navegación aledaña. Esta plataforma se caracteriza por no mantener un control aéreo estricto, se planea con anticipación la posible ruta que desempeñaría basándose en el viento atmosférico y elevación solar principalmente. También, se está desarrollando el método de vuelo autónomo mediante aprendizaje reforzado, el cual consiste en “utilizar el aumento de datos y un diseño auto-correctivo para superar el reto técnico clave del aprendizaje por refuerzo a partir de datos imperfectos” según los autores de esta investigación (Bellemare et al., 2020).

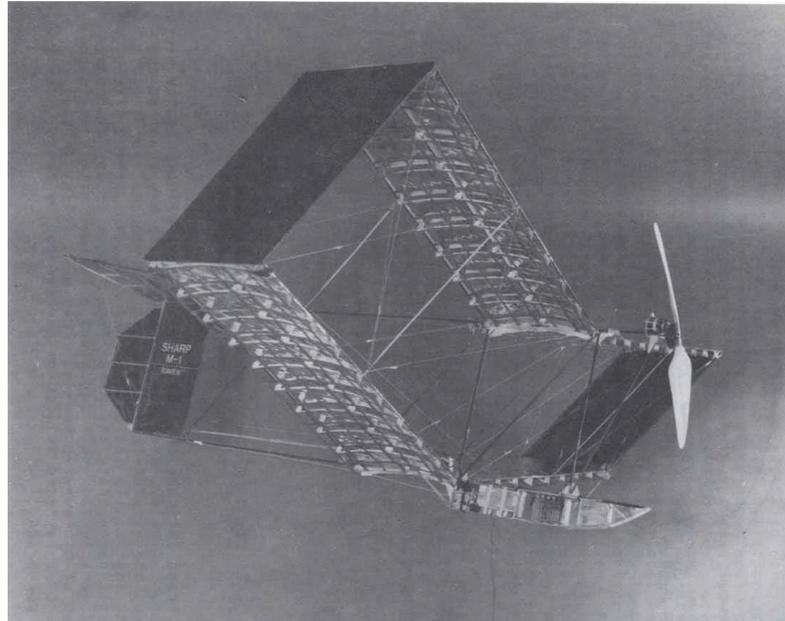
La Figura 7 muestra a la plataforma que lleva una góndola donde se equipa la carga útil que representa entre el 90 y 95% de la fuerza ascendente, por lo que, se debe considerar el peso de la carga útil de entre 5 y 10% menor a la capacidad de flotabilidad de la plataforma. Una vez en vuelo, mantienen el control de su altitud mediante válvulas de escape (en el caso del tipo presión cero) que permiten que la presión sea igual a la exterior. En cuanto a los globos de superpresión, están totalmente sellados y mantienen una presión más alta en su interior elevándose hasta que encuentren la flotabilidad neutra o hasta que revienten, pudiendo recuperarlos con un paracaídas lo que los hace altamente flexibles a mejoras, así como reusables.

## 2.4 Estado actual de plataformas aéreas

La historia de la aeronáutica se puede rastrear desde hace cientos de años, aunque es importante mencionar que se aceleró desde 1900, y su progreso creció exponencialmente en las últimas décadas. Desde entonces, las aplicaciones de las aeronaves no solo crecieron, sino que se han diversificado y propuesto como soluciones alternativas a problemas que afectan áreas específicas. Las comunicaciones inalámbricas forman parte de las operaciones aeronáuticas modernas, siendo ya indispensables en muchas aplicaciones y servicios aeronáuticos, de esta manera se destacan algunos registros de la tecnología HAPS.

La Figura 8 muestra un prototipo del proyecto SHARP, siendo uno de los proyectos pioneros de la tecnología HAPS aplicado a las telecomunicaciones. El prototipo consiguió transmitir radioenlaces por microondas, también demostró la posibilidad de establecer enlaces tierra – aire a una altitud de 50 m, pero el modelo final operaría a 21 km de altitud cubriendo 600 km de diámetro. Sin embargo, tras varios vuelos exitosos, se canceló debido a una crisis presupuestaria (Jull, 1985).

Otro antecedente de los aerodinos es el de Gran Altitud y Larga Duración (del inglés *High-Altitude Long-Endurance*), fueron desarrollados por la NASA bajo el nombre Helios, que iniciaron con el prototipo HP01 en el año 1999. El desarrollo de este proyecto concluyó que era demasiado complejo desarrollarlo ante las diversas variables dinámicas causadas por el movimiento continuo de la aeronave, sobrepasando los recursos técnicos y de material intelectual con los que se contaba, dando fin al proyecto en 2004 (Noll et al., 2004).



**Figura 8** Modelo prototipo Stagger SHARP (del inglés *Stationary High Altitude Relay Platform*). Recargado por baterías voló a una altitud de 50 m, también logró transmitir a la frecuencia de 2.5 GHz (Jull, 1985).

Por otro lado, la plataforma *SkyStation International* fue un proyecto piloto a finales de los noventa, consistió en un aerostático con tecnología 3G o Tercera Generación, que podía proveer 150 km de radio de cobertura a una altitud de operación de 20 km. Llevaba como carga útil un arreglo de 700 antenas alimentadas por energía solar, la UIT-R se interesó, por lo que trabajó en conjunto con el sector privado para crear la recomendación F.1500, siendo este el proyecto que impulsó las regulaciones de HAPS (Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2000).

Anteriormente, se menciona que la tecnología HAPS se consideró en redes 3G, fungiendo como alternativa a las redes terrestres en zonas remotas. Esto no se realizó debido a la falta de madurez de la tecnología, por mencionar algunos aspectos estaba el tiempo de operación, tipo de plataforma, protocolos de comunicación y falta de inversión económica. Durante el periodo de madurez de la tecnología surgieron diferentes diseños innovadores, a continuación, se describe el estado actual de los HAPS a través de los proyectos que siguen vigentes, así como algunas de sus características.

De las plataformas tipo globo libre, *Thunderhead Balloon System* de *Raven Aerostar* destaca por redefinir las misiones estratosféricas y proporcionar una persistencia efectiva ante su costo, apostando por un HAPS con tecnología LTE (*Long-Term Evolution*) a 22 km de altitud. También ha demostrado tener la capacidad de proveer conexión a Internet a poblaciones apartadas, negadas o afectadas por desastres. En esta misma línea, *Elevate* de *Zero 2 Infinity* ofrece desde el año 2009 el servicio de transportación de carga útil a la

estratósfera, validando y probando diferentes tecnologías relacionadas con HAPS. Puede alzar hasta 100 kg entre 18 y 22 km de altitud durante 24 horas, por lo que el servicio ofrecido se basa en la altitud, duración y peso de la carga útil según los requisitos de la aplicación de esta última (Karabulut Kurt et al., 2021). Con la tecnología 4G LTE de la IMT-2010, proyectos como *Loon* y *Aquila* lograron exitosamente proveer de cobertura de servicio móvil, en donde cumplieron los parámetros de calidad. *Loon* de *X Company* es otro ejemplo de las plataformas globo libre y se muestra en la Figura 9, esta fue desplegada en el continente africano y también realizó un viaje por el espacio aéreo de México como parte de sus ensayos (Loon, 2020).



**Figura 9** El proyecto *Loon*, exitosamente realizó comunicaciones aire-aire con una velocidad de datos de 0.15 Gbps (X Company, 2024).

Para el caso de las plataformas de tipo aerostato, se menciona a la *A.I.R.S.H.I.P.*<sup>2</sup> de *Galaxy Unmanned Systems LLC* (2024), la cual comenzó su recorrido alrededor del mundo para demostrar su capacidad de autonomía con mínima supervisión humana. Tiene un diseño “*inspirado en la naturaleza*” de acuerdo con sus creadores, ya que los diferentes sistemas tienen como propiedad ser “*regenerativos*”, esto lo logra con IA y una alimentación del 100% por energía renovable. Las tareas que desarrolla el despliegue son del área de comunicaciones críticas y de reconocimiento mediante sensores. Similarmente, la *Wireless Infrastructure Platform* de *Avealto Ltd.* es capaz de proveer servicios 4G LTE y 5G. Situándose entre 18 y

22 km de altitud, proveerá cobertura de entre 240 y 480 km de diámetro, y está diseñado para operar de 3 a 6 meses con una capacidad mínima de carga útil de 55 kg. Con fecha estimada de lanzamiento para el año 2025, pretende ser desplegado en el Canal de Panamá para usuarios marítimos, terrestres y de zonas remotas (Cao et al., 2023). Asimismo, *Stratobus* de *Thales Alenia Space* (2017) tiene como objetivo proporcionar servicios de comunicaciones 5G, desde una altitud de 20 km, cubriendo hasta 500 km de diámetro. Se pronostica que el aerostático de 115 m de longitud y 34 m de ancho, sea capaz de realizar operaciones de 5 años de duración con una carga máxima de 450 kg, requiriendo de mantenimiento anual.

En el caso del estado actual de los aerodinos, se encuentra a *Zephyr S* de *Airbus Defense and Space* el cual pretende conectar a las personas aisladas alrededor del mundo. Esta plataforma registró el vuelo continuo de mayor duración en aerodinos durante 100 días ininterrumpidos, con una carga útil de 12 kg y una envergadura de 25 m. Consiguió transmitir a una velocidad de 100 Mbps manteniendo una altitud superior a 18 km, alimentándose de energía solar y baterías secundarias recargables, donde mantuvo 250 W de potencia durante el vuelo (Karabulut Kurt et al., 2021).

Por otro lado, el *PHASA-35* de *BAE Systems and Prismatic* (2024) se diseñó para ofrecer varios servicios, entre estos los de 5G. Con capacidad de potencia de hasta 1000 W puede permanecer hasta 1 año en vuelo continuo, a una altitud de entre 17 y 21 km y 15 kg de carga útil cubre un radio de 200 km. Finalmente, *Sunlider* de *SoftBank Corp.* es un aerodino que se utilizó por primera vez para proveer conectividad 4G LTE. Su diseño de 78 m de envergadura le permite durar varios meses en operación y en 2020 completó un vuelo de casi 6 horas a 19 km de altura, confirmando su potencial como una estación base aérea (Karabulut Kurt et al., 2021).

Con el fin de presentar una versión de la posible cronología de eventos que marcaron el desarrollo de la tecnología HAPS, se realizó la Tabla A - 1 en Anexos que muestra información de proyectos en desarrollo. Esta tecnología está marcada por los retos que presenta la atmósfera terrestre, la cual ha abierto una nueva frontera en la exploración de la tierra.

## **2.5 Situación actual de HAPS en redes 5G**

En este subtema se describe la situación actual de las plataformas en redes 5G, así como el contexto que lo cubre, los HAPS emergen como una tecnología clave para la implementación de las comunicaciones inalámbricas de esta generación, siendo también un pilar para el desarrollo de la infraestructura del futuro.

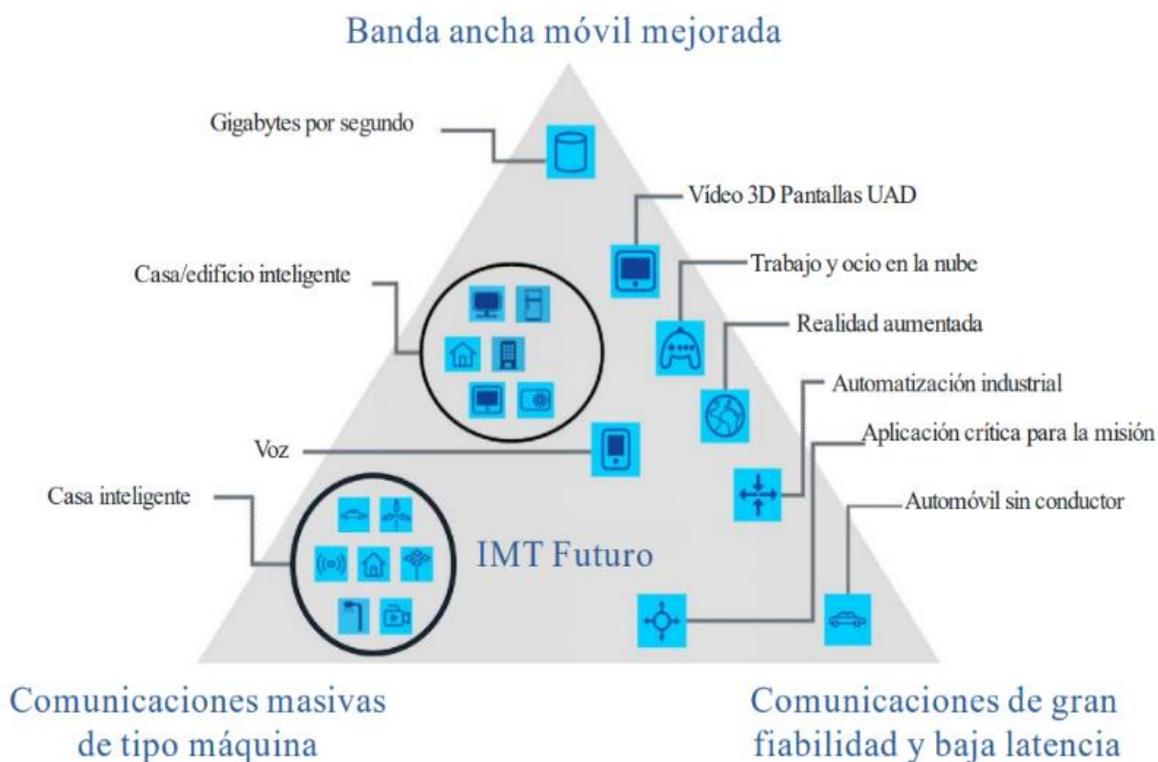
La 5G trae consigo un cambio en los paradigmas de la infraestructura, gracias a los avances en la tecnología la convierten en un ecosistema dinámico. Por lo tanto, se redactaron descripciones de algunos componentes, que al ser integrados sobre los HAPS habilita la proveeduría de servicios digitales, y como consecuencia, el término HIBS le es aplicado a la plataforma por su relación con el ecosistema 5G.

### 2.5.1 Ecosistema 5G

Las redes 5G las describe el IFT (2024b) de México como *“la quinta generación de comunicaciones móviles”*, mientras que su filosofía versa *“Cuando sea, Donde sea, A quien sea, A cualquier cosa”* o del inglés *“Anytime, Anywhere, Anyone, Anything”*, sin embargo, existen diferentes perspectivas en la literatura respecto al ecosistema 5G que aportan en diferentes campos de las ciencias aplicadas (Aranda et al., 2021; Lin et al., 2021; Velev et al., 2018). Aun así, la mayoría de los autores concuerdan con aspectos puntuales, este se caracteriza por *“mayor velocidad de transmisión”, “baja latencia”, “mayor ancho de banda”, “mayor capacidad para conectar dispositivos simultáneamente”* y *“menor consumo de energía”* en comparación a la anterior generación. Antes de desplegar una red 5G, es recomendable conocer las capacidades que necesita de acuerdo con el escenario y aplicación que desempeñará, para esto la UIT-R definió *“casos de uso”* que ayudan a localizar la aplicación y/o escenario donde será desplegada la red. De acuerdo con la UIT-R, son tres casos de uso y se distinguen por sus capacidades, estos los llaman *“Comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia”, “Comunicaciones de tipo máquina masivas”* y *“Banda ancha móvil mejorada”* (Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2015).

En particular, el caso de uso *“Comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia”* o uRLLC (del inglés *ultra-Reliable Low Latency Communications*), ofrece garantizar la seguridad y la eficiencia operativa en entornos de autonomía, críticos o industriales, por ejemplo. De ahí que, el caso de uso desbloqueó la creación de sistemas ciberfísicos mediante la introducción de tecnologías de información y comunicación moderna 5G, como lo es la *“Industria 4.0”*. También, el caso de uso *“Comunicaciones de tipo máquina masivas”* o mMTC (del inglés *massive Machine Type Communications*) permite la interconexión masiva de dispositivos, facilitando el monitoreo remoto y la recolección continua de datos. Esto último trae como resultado procesos más eficientes y flexibles que estuvieran limitados por conexiones por cable, aumentando la capacidad de gestión de los dispositivos conectados. Por otro lado, el caso de uso *“Banda ancha móvil mejorada”* o eMBB (del inglés *enhanced Mobile Broadband*), proporciona velocidades de datos significativamente más rápidas y un mayor ancho de banda. Esto permite experiencias más inmersivas y de alta calidad para los usuarios en servicios digitales como transmisión de vídeo en alta definición,

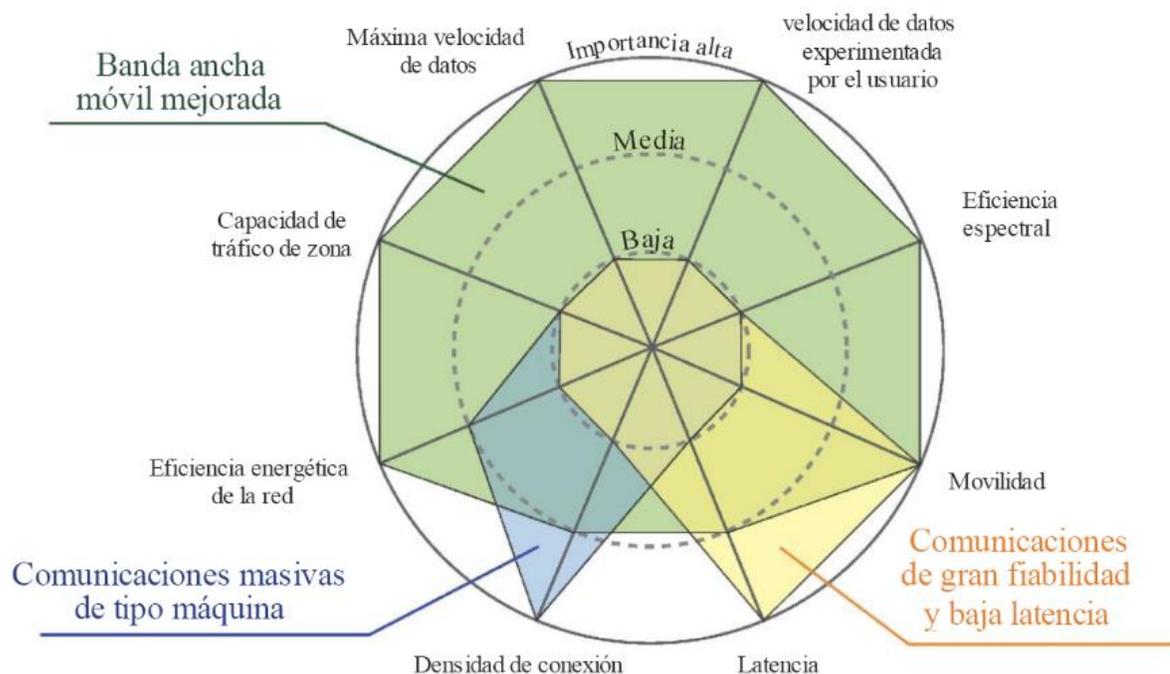
realidad aumentada y virtual, por ejemplo. La relación entre casos de uso se explica en la recomendación M.2083-0, en su contenido muestra un grafo de un triángulo donde cada uno de sus vértices se posiciona un caso de uso, esta se muestra en la Figura 10.



**Figura 10** Casos de uso, aplicaciones y escenarios de la IMT-2020 por la UIT-R (2015).

El posicionamiento de la aplicación dentro del triángulo está influenciado por su contexto operativo, por ejemplo, la implementación de 5G en el sector de la salud se encuentra revolucionando la telemedicina mediante la realización de cirugías remotas y el monitoreo constante de pacientes en tiempo real. La baja latencia y la alta fiabilidad son esenciales para estas aplicaciones, para asegurar que las comunicaciones médicas sean precisas y seguras, por lo que se asume que su posición en el triángulo se encontrará cerca del caso uRLLC.

Si la aplicación es el despliegue de un hospital inteligente, necesitará gestionar cientos o miles de dispositivos conectados. Por lo tanto, este despliegue debe tener capacidades tanto de uRLLC como de mMTC. Es esencial reconocer las "*capacidades fundamentales*" del despliegue en general, en relación con el caso de uso específico de la aplicación. En la Figura 11, se observa el diagrama radial de las capacidades fundamentales en dependencia de su importancia en los casos de uso.



**Figura 11** Diagrama radial de las capacidades fundamentales para los tres distintos casos de uso propuestos en la IMT-2020 por la UIT-R (2015).

Ante todo, se observa en la Figura 11 las capacidades fundamentales que son requisito en el entorno IMT-2020, junto a esto, está la importancia evaluada del requisito para cada caso de uso. De esto mismo, se dice que la “*velocidad de datos experimentada por el usuario*” se refiere a la velocidad real a que un usuario percibe en su transferencia de información, se mide en megabits por segundo (Mbps) y establece la cantidad máxima de datos que se pueden descargar o subir a la red. Sin embargo, en algunas situaciones puede referirse a la “*velocidad teórica de transferencia*” y no necesariamente a la velocidad real experimentada por los usuarios, la cual depende de factores como la calidad de la conexión, la congestión de la red y la capacidad del dispositivo utilizado, donde pueden afectar de forma significativa. Por otro lado, la capacidad de “*máxima velocidad de datos*” de la red, puede alcanzar hasta 10 gigabits por segundo (Gbps) en condiciones ideales, especialmente en entornos con *hotspots* como estaciones de tren o estadios deportivos. Esta velocidad es significativamente mayor que la de las redes 4G LTE y ofrece una mejora considerable en la estabilidad de la conexión y la gestión del tráfico de datos.

Continuando con las capacidades fundamentales, existe la “*latencia*” o “*retardo*” que es el tiempo de demora en transmitir los paquetes de información mediante la red 5G, la cual requiere que sea extremadamente baja para aplicaciones uRLLC, alcanzando menos de 1 milisegundo (ms). Esta baja latencia es fundamental para aplicaciones que requieren comunicación instantánea y en tiempo real, se

logra a partir de la utilización de frecuencias más altas y técnicas avanzadas de modulación y multiplexación, por mencionar algunas. Por otro lado, la “*movilidad*” se refiere a la velocidad de movimiento del usuario que las estaciones base soportan, se considera entre un rango de 0 a 500 km por hora (km/hr), siendo el máximo de velocidad un desafío para las nuevas redes de ondas milimétricas para escenarios como trenes de alta velocidad. Esta característica es crucial para la interconexión en tiempo real de un mayor número de dispositivos y vehículos, y a su vez, para la implementación de tecnologías como el Internet de las Cosas o IoT (*Internet of Things*) y conducción autónoma.

Respecto a la “*densidad de conexión*”, el despliegue 5G debería soportar hasta un millón de dispositivos conectados por kilómetro cuadrado (dis/km<sup>2</sup>), en comparación con los 100 mil dispositivos que la red 4G LTE puede manejar. Esta mejora es crucial para impulsar también el IoT, ya que considera el número de dispositivos que se espera que se conecten en el futuro. En cambio, la capacidad de “*eficiencia espectral*” mide cuánta información puede transmitirse por unidad de ancho de banda, expresada en bits por segundo por hertz (bps/Hz). La eficiencia es elemental para optimizar el uso del espectro radioeléctrico, especialmente en un entorno donde los recursos de ancho de banda son limitados. Por lo que, para permitir un aumento en la capacidad y velocidad de las redes se debe mejorar la eficiencia espectral, el tipo de modulación entre otros factores determinan este índice.

Pasando a la “*eficiencia energética de la red*”, está diseñada para ser más eficiente en términos de energía en comparación con las generaciones anteriores de redes móviles, la red 5G es hasta un 90% más eficiente que el 4G LTE en términos de consumo de energía por unidad de tráfico (Atala et al., s/f). Sin embargo, la implementación de la infraestructura necesaria para soportar la tecnología 5G, como estaciones base y centros de datos, puede consumir grandes cantidades de energía, especialmente en áreas de alto tráfico. Para mitigar esto, los dispositivos 5G cambian a modos de bajo consumo cuando no están en uso, lo que ayuda a reducir el consumo de energía. La eficiencia energética también se ve beneficiada por la capacidad de las redes de adaptarse a dispositivos y a aplicaciones, permitiendo un uso más eficiente de los recursos como energía y ancho de banda, resultando en una mejor gestión y reduciendo el desperdicio.

Por último, la “*capacidad de tráfico de zona*” se refiere a la cantidad de datos que pueden ser transmitidos en un área determinada en un momento dado, este requerimiento garantiza una conexión estable y rápida en áreas con alta densidad de usuarios y dispositivos. Asimismo, está relacionada con la “*densidad de usuarios*” que exista en dicha área y tiempo dado, ya que requerirá una mayor capacidad de tráfico para garantizar una conexión estable. En caso de que sea necesario a una mayor “*velocidad de transferencia*” de datos, también va a requerir una mayor capacidad de tráfico para garantizar una conexión rápida y

estable. Por ejemplo, en los escenarios de respuesta a emergencias y seguridad pública, las latencias de tan solo 1 ms permitirían una coordinación perfecta entre los equipos de primera intervención y las salas de control. También, las altas velocidades de transferencia de datos (que a menudo superan los 10 Gbps), posibilitan los servicios como la transmisión de vídeo de alta definición y transferencias de datos masiva, resultando en un mejor reconocimiento de la situación.

Con respecto a la arquitectura de la red 5G, se estableció que se basa en tecnologías y componentes clave que posibilitan las capacidades antes definidas, cumpliéndolas con el fin de ofrecer velocidades de datos más rápidas, menor latencia y una mayor capacidad en comparación con las generaciones anteriores de redes móviles. Para esto diversos actores colaboraron, incluyendo operadores móviles de telecomunicaciones, fabricantes de equipos, desarrolladores de aplicaciones, instituciones reguladoras, académicos y usuarios. Con el fin de presentar las tecnologías que se relacionan con los HIBS, se destacaron de manera general algunas tecnologías clave para la habilitación del ecosistema 5G.

Primeramente, la Red de Acceso por Radio o RAN (*Radio Access Network*) conecta los dispositivos de los usuarios con la Red Central 5G o 5GC (*5G Core*), abarcando todos los equipos (*hardware*) y programas informáticos (*software*) necesarios para proporcionar conectividad inalámbrica, incluyendo estaciones base, plataformas, antenas e infraestructura de red asociada. También, incorpora nuevas bandas del espectro radioeléctrico y tecnologías avanzadas de antenas para mejorar la velocidad de datos y cobertura. Ahora, la RAN está conectada con el 5GC mediante protocolos de manera lógica y por fibra óptica de manera física, la cual parte desde un nodo central para conectarse a la 5GC. Continuando, el 5GC es la pieza central del ecosistema, proporciona servicios y funciones, gestiona la conectividad, movilidad, seguridad y políticas de datos.

Esta red es fundamental para aprovechar todo el potencial de los servicios 5G, ya que habilita la implementación de funciones y recursos de red bajo demanda para satisfacer las diversas necesidades comerciales de las industrias verticales futuras. También proporciona una gestión y control más granulares de los flujos de tráfico y aplicaciones, mejorando la eficiencia y capacidad de la red. Al mismo tiempo permite una mayor escalabilidad y actualizaciones flexibles, lo que facilita la implementación en plataformas en la nube. Tecnologías clave fueron desarrolladas para aprovechar más la parte lógica de la arquitectura, es así como la Segmentación de Red o "*Network Slicing*" crea múltiples redes virtuales independientes sobre una misma infraestructura física. Cada red virtual o "*slice*" define de manera flexible los recursos de computación, almacenamiento, red y confiabilidad, de acuerdo con las necesidades específicas del servicio, industria o usuario. Esto último, les da oportunidad a los operadores de redes

reducir costos de construcción de múltiples redes privadas, proporcionando a la vez servicios flexibles bajo demanda.

Por otra parte, existe la Virtualización de Funciones de Red o NFV (del inglés *Network Functions Virtualization*) y el uso de Redes Definidas por Software o SDN (*Software Defined Networks*), son arquitecturas de red clave en despliegues 5G para mejorar la flexibilidad y eficiencia en la gestión de recursos de red. SDN y NFV son arquitecturas emergentes que no entran en conflicto, es un hecho que las aplicaciones SDN pueden servir de referencia para el desarrollo de NFV. SDN, “*implementa la programabilidad de la red*”, mientras que NFV “*desacopla las funciones de red de los dispositivos de hardware*”. NFV desacopla las funciones de red de los dispositivos tradicionales para implementar el “*plano de funciones de red*” a la virtualización. Cuenta con estándares del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones o ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), por lo que se facilita la simplificación del mantenimiento y existe una ampliación flexible, además de que la “*función de reenvío por hardware*”, no depende de un hardware específico.

Por lo que, la arquitectura NFV se concentra en optimizar funciones de red como la Calidad de Servicio o QoS (*Quality of Service*) y el “*control de flujo de datos*”, por ende, los proveedores de servicios propusieron NFV para sustituir los dispositivos de red independientes por “*dispositivos de hardware unificados*”. Por otro lado, SDN desacopla el “*plano de reenvío*” del de control para implantar un “*control de red*” automático y programable, permitiendo que los dispositivos de la red sean programables para implantar una “*gestión y control centralizados*”. En cambio, el “*plano de control*” es abierto y programable, mientras que el hardware sigue siendo responsable del reenvío y el plano de control de la toma de decisiones. Bajo el estándar de la *Open Networking Foundation*, se define el origen del SDN en un recinto de operaciones y su maduración en un centro de datos, facilitando las operaciones de gestión simples.

Continuando con las tecnologías clave, existe la Computación de Borde o “*Edge Computing*” que optimiza el rendimiento desplazando la computación, desde los centros de datos hacia el borde de la red, aliviando la carga del 5GC. Esto lo realiza explotando dispositivos como objetos inteligentes, teléfonos móviles y nodos, por lo que el *Edge Computing* funciona como un regulador de recursos en tiempos de alta demanda, dando como resultado una mejora en la privacidad y seguridad de datos sensibles. Sin embargo, al distribuir la lógica a diferentes nodos de la red, aparecen nuevos retos y problemas, tecnologías como la IA y el “*Big Data*” prometen apoyar en este sentido. Fomentando la innovación y la eficiencia en diversos sectores principales, impulsan nuevas aplicaciones y servicios, así como un mejor aprovechamiento en la recolección de datos y alivio en la lógica de la red. (Aranda et al., 2021; Instituto Federal de

Telecomunicaciones, 2024a). Otro aspecto importante de la arquitectura 5G, es el uso de tecnologías avanzadas de antenas como lo son la tecnología MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), esta mejora la calidad de señal, capacidad y cobertura de la red empleando un gran número de antenas en las estaciones base, y así, atendiendo la masificación de dispositivos.

De acuerdo con la visión de la IMT-2020, se espera que la arquitectura de 5G posibilite la interconexión de dispositivos y objetos físicos a través de la Internet. Para despliegues masivos de IoT, la red deberá ser capaz de soportar una gran cantidad de dispositivos conectados con baja latencia y alta fiabilidad, así como garantizar la satisfacción de las diversas demandas de los usuarios y aplicaciones de manera eficiente. Cada servicio tiene necesidades acordes con su aplicación, por ejemplo, el IoT que es utilizado en la agricultura inteligente, no exige los mismos parámetros en latencia y fiabilidad que la telemedicina, lo mismo sucede con ciudades inteligentes, su escala de la cantidad de dispositivos conectados es mayor que en la Industria 4.0. Este cambio de paradigma designa a los HIBS como parte elemental para la extensión de las capacidades del ecosistema 5G en todo el mundo, la IFT pretende impulsar el despliegue de la nueva generación y preparar el camino para las futuras generaciones integrando las tecnologías clave antes vistas a la infraestructura nacional.

### 2.5.2 Redes no terrestres

El tiempo y la innovación han reducido el costo de componentes críticos, lo que ha dado lugar a proyectos de infraestructura de Redes No Terrestres (NTN) más accesibles y rentables. Las NTN se refieren a cualquier red de comunicación que conecta la red central con objetos no terrestres y/o terrestres. Estas redes ofrecen una alternativa económica a la fibra óptica, logrando velocidades de transmisión de datos comparables a un costo significativamente menor, además de proporcionar una cobertura inalámbrica amplia en áreas donde el despliegue de fibra óptica es inviable (ETSI, 2023; Huang et al., 2024).

Avances como la mayor efectividad de los paneles solares, la aviónica de control autónomo, los metamateriales ultraligeros y las antenas de fase, abren nuevas fronteras en la viabilidad de las NTN (Karabulut Kurt et al., 2021). Por otro lado, en este apartado se describen los objetos no terrestres que incluyen HAPs, Plataformas de Baja Altitud o LAP (*Low Altitud Platforms*), plataformas con Órbita Geoestacionaria o GSO (*Geosynchronous Earth Orbit*) y plataformas con Órbita No-Geoestacionaria o NGSO (*Non-Geosynchronous Earth Orbit*) (Saad et al., 2024). Las plataformas GSO son satélites Geoestacionarios a la Tierra (GEO) comúnmente, pero las NGSO incluyen plataformas como las de Órbitas

Bajas a la Tierra (*Low Earth Orbit*, LEO) o Muy Bajas a la Tierra (*Very Low Earth Orbit*, VLEO), además de la Órbita Media a la Tierra (*Medium Earth Orbit*, MEO).

Por otro lado, se enfatiza que las redes aéreas funcionan de manera independiente o en conjunto con redes terrestres y/o espaciales. Las LAPs y HAPs, al ser altamente flexibles y móviles, permiten un despliegue rápido en situaciones que requieran ampliar la capacidad de las redes terrestres existentes, reducen latencia y mejoran la QoS (GSMA, 2022). Existen diferencias notables entre ambas plataformas, por ejemplo, las HAP están diseñadas para levantar cargas útiles a altitudes de hasta 50 km, pero las LAP no superan los 1,000 metros de altura.

Esto le da ventaja a las LAP, que reduce drásticamente las pérdidas por propagación en los radioenlaces, en comparación con los HAPS, dándoles ventaja en zonas altamente pobladas. Frente a las LAPs, los HAPS pueden permanecer casi estáticas respecto al suelo por períodos más prolongados, transportar más unidades de comunicación y ofrecer una gama más amplia de servicios. Así que, se puede deducir que entre LAPs y HAPS existe una brecha significativa en sus escalas, lo cual al complementarse pueden ser aplicadas en otro rango de servicios más ambiciosos del ecosistema 5G.

Si se requiere más información sobre las diferencias entre estas plataformas, la Tabla B - 1 en Anexos las compara bajo sus características, especificaciones típicas, retos y oportunidades en la integración de 5G/6G, proporcionando una idea más clara de las posibilidades de cada plataforma y su valor en las NTN. También, se muestra en la Figura 12 un ejemplo de red aérea con una estructura jerárquica basada en la tecnología SDN.

Continuando con los HAPS, al compararse con las demás plataformas como los satélites, los HAPS brindan mayor capacidad de enlace, menores costos de lanzamiento y mantenimiento junto con una menor latencia de transmisión. La elección de la plataforma NTN adecuada dependerá de los requisitos específicos de la aplicación, así como la cobertura necesaria, la latencia tolerable y el presupuesto disponible (GSMA, 2022). Se consideró la arquitectura simple de NTN de acuerdo con la visión de 3GPP, esta arquitectura se muestra en la Figura 13 y Figura 14 donde el satélite o HAP, contarán con una carga útil de telecomunicaciones “transparente” o “regenerativa”.

Ahora, las cargas a bordo de las plataformas permiten realizar diferentes tareas con impactos distintos en la infraestructura física de las telecomunicaciones. Pasando con la primera, una carga útil “transparente” actúa como nodo repetidor común retransmitiendo señales sin procesarlas y solo amplificándolas, lo que

facilita la implementación ya que no requiere modificaciones en los dispositivos terminales. A la vez, el diseño de la carga permite una comunicación más directa entre terminales y plataformas, lo que puede resultar en menores tiempos de latencia bajo ciertas condiciones operativas.

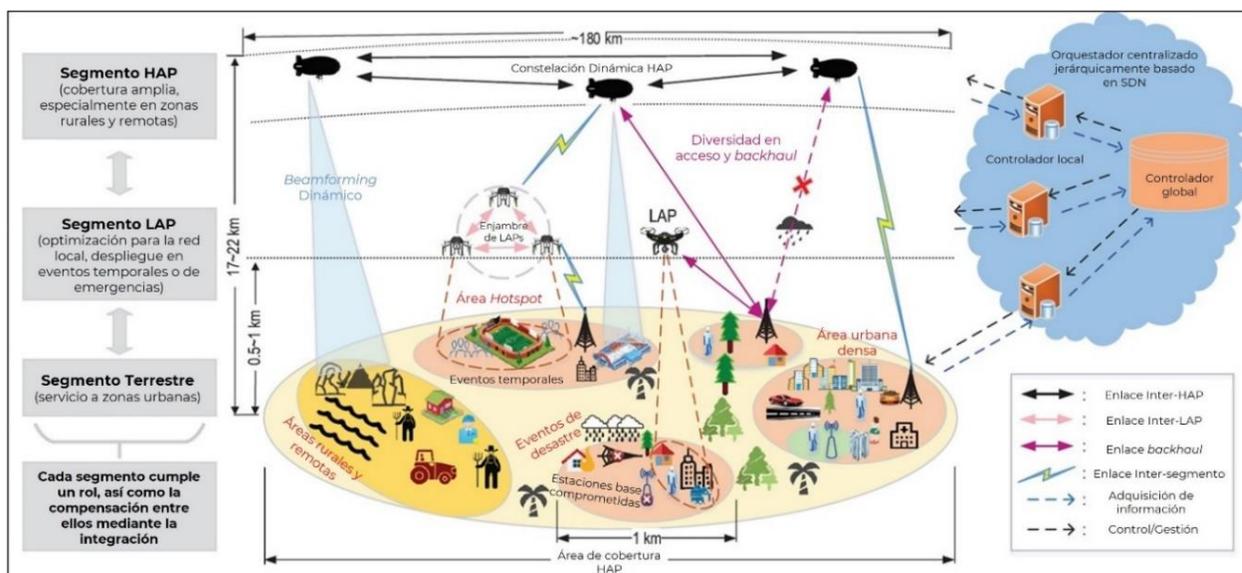


Figura 12 Esquema de la arquitectura jerárquica de una red integrada aire-tierra propuesta por Qiu et al. (2019).

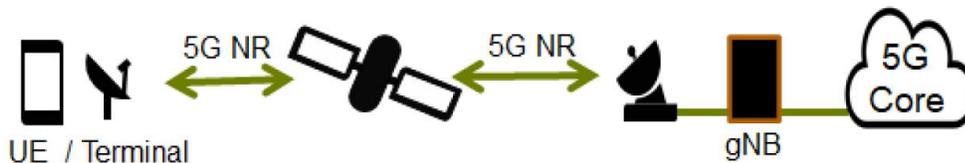


Figura 13 Arquitectura de acceso directo por NTN, donde la plataforma cuenta con una carga útil "transparente" a bordo (ETSI, 2023).



Figura 14 Arquitectura de enlace de pasarela por NTN, donde la plataforma cuenta con una carga útil "regenerativa" a bordo (ETSI, 2023).

Por otro lado, las plataformas con carga útil "regenerativa" no solo actúan como repetidores, también incorporan funciones típicas de una BS, procesando y gestionando las señales a bordo, mejorando la eficiencia y reduciendo la latencia de la red. Se debe destacar que, el procesamiento de datos consta de optimizar la calidad de la señal, gestionar el tráfico, así como enrutarlo y conmutarlo, resultando en una

mejor QoS y Calidad de Experiencia del usuario o QoE (*Quality of Experience*). Finalizando, también esta permite que las comunicaciones sean menos dependientes de las estaciones terrestres, lo que es especialmente beneficioso en áreas remotas o de difícil acceso (Yuxuan, 2023).

Continuando con la descripción de la arquitectura NTN, debe contener al menos un Nodo de Siguiete Generación o gNB (*Next Generation Node*), este funciona como una carga regenerativa, siendo fundamental en la arquitectura que se realicen las tareas antes mencionadas (ETSI, 2023). Por otra parte, los radioenlaces que comunican a los componentes de la arquitectura utilizan tecnología “5G New Radio” (5G NR), esta se basa en una estructura de red flexible y escalable, que utiliza una combinación de tecnologías y técnicas para ofrecer una conectividad rápida y eficiente, este concepto se abordará más adelante.

### 2.5.3 Redes integradas espacio – aire – tierra

Las Redes Integradas espacio – aire – tierra o SAGIN (del inglés *Space-Air-Ground Integrated Networks*) son redes que combinan las capacidades de infraestructura terrestre y no terrestre, segmentadas en capas virtuales individuales y operando de manera aislada coordinadamente. La cualidad de interoperabilidad entre estas redes no puede faltar, por lo que, los diferentes sistemas y tecnologías deben comunicarse y funcionar juntos de manera fluida y eficiente, intercambiando parámetros de control y de calidad en tiempo real para satisfacer distintos escenarios y aplicaciones. La cualidad permite que las redes de infraestructura trabajen en paralelo, así mejorando notablemente el rendimiento, cobertura y eficiencia de las redes (Anjum et al., 2023).

Una vez desbloqueada la interoperabilidad será posible la integración completa de las redes, lo cual es un desafío en sí complejo, ya que factores como la diversidad de plataformas, estándares, ambiente y el hermetismo de fabricantes de equipos afectan en el cometido. De acuerdo con el autor Lin et al. (2021), existe un creciente interés en integrar redes y plataformas espaciales y aéreas al ecosistema 5G para aprovechar sus ventajas y capacidades, al corto plazo esto no es posible, pero la literatura muestra que la fase de experimentación comenzó.

Sin embargo, para la siguiente generación o 6G, la SAGIN es un pilar en su despliegue que promete solucionar problemas específicos como la alta latencia de las NTN, la flexibilidad limitada por el *hardware* dedicado y la arquitectura orientada a servicios, donde se busca lograr la cobertura ubicua (Cui et al.,

2022). Es crucial destacar las diferencias entre las plataformas y las redes que las componen, ya que, como red SAGIN, cada una cubre las limitaciones de la otra. Por esta razón, esta investigación compara las capacidades de las distintas plataformas, como se muestra en la Tabla 1.

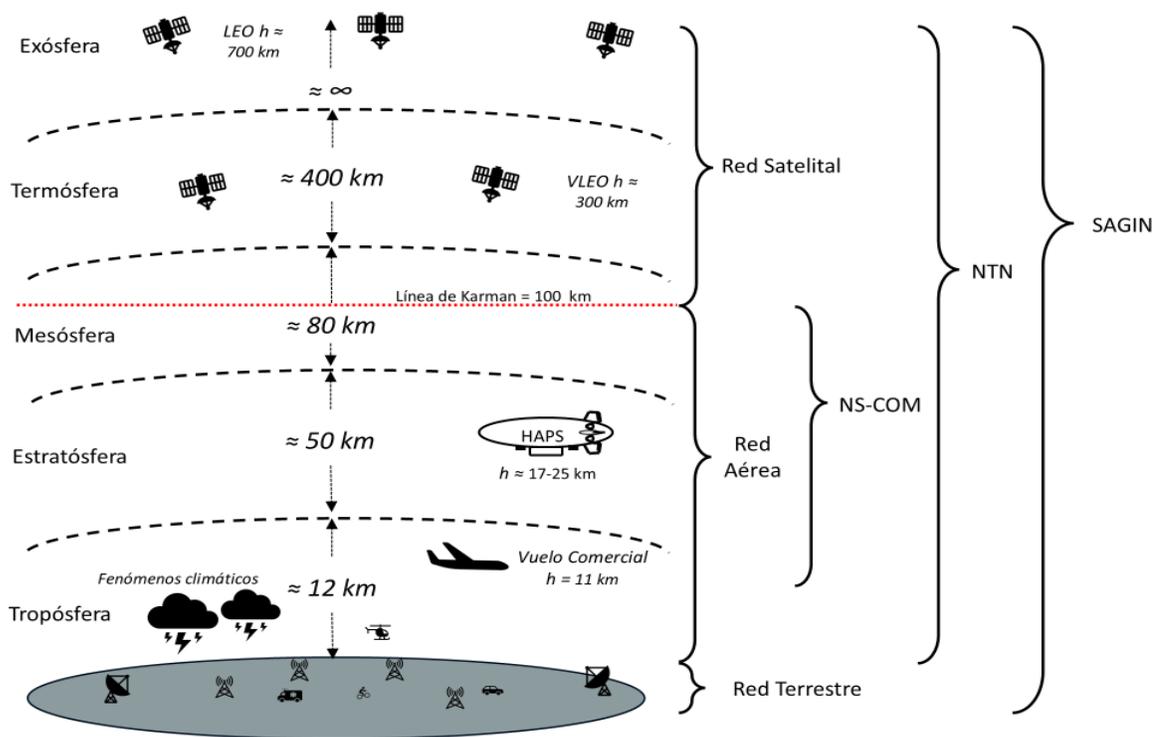
**Tabla 1** Comparativa de las capacidades entre plataformas que componen la red SAGIN (Alam et al., 2021; GSMA, 2022; Lin et al., 2021; Xiao et al., 2022).

Característica	Terrestre	LAP	HAP	VLEO	LEO	GEO
<b>Altitud</b>	N/A	100-1,000 m	17-50 km	250-500 km	500-2,000 km	36,000 km
<b>Tiempo de operación</b>	Permanente	Horas	Semanas o meses	Permanente	Permanente	Permanente
<b>Cobertura</b>	Local	Local	Amplia	Global	Global	Regional
<b>Latencia</b>	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Alta	Muy alta
<b>Movilidad</b>	Estático	Variable	Cuasi-estacionario	Rápida	Rápida	Geosíncrono
<b>Pérdidas FSPL</b>	60-100 dB	101-113 dB	120-155 dB	169-175 dB	175-187 dB	190-195 dB
<b>Costo de operación</b>	Moderado	Bajo	Moderado	Alto	Alto	Alto
<b>Propósito</b>	Comercial	Específico	Específico	Comercial y específico	Comercial y específico	Comercial y específico

Asimismo, la Tabla 1 compara las capacidades de las plataformas que componen a la SAGIN, destacando sus características en términos de altitud, tiempo de operación, cobertura, latencia, movilidad, Pérdidas de Trayectoria en el Espacio Libre o FSPL (*Free Space Path Lost*) y costo de operación. El integrar a las distintas plataformas en una sola red ofrece ventajas significativas, aprovechan las fortalezas de cada una y superan limitaciones que afecten en distintos escenarios. Por ejemplo, las plataformas terrestres ofrecen baja latencia y cobertura local, mientras que las plataformas espaciales brindan una cobertura más amplia, pero con mayor latencia. Mientras que los LAPs y HAPs se posicionan como soluciones intermedias, combinando una cobertura relativamente amplia con una latencia moderada y un costo reducido en comparación con los satélites. También, SAGIN promete aprovechar la infraestructura existente de los operadores móviles de TN, reduciendo los costos y el tiempo de despliegue de una red dedicada.

Por otra parte, en la literatura se propone una clasificación adicional: las Comunicaciones del Espacio Cercano o NS-COM (*Near Space – Communication*) donde los HAPs son protagonistas y se posicionan a diferentes altitudes dando como resultado una red aérea robusta. Dicha clasificación contribuye con la evolución del ecosistema 5G, sin embargo, solo se limita a explorar la optimización en redes aplicadas a las comunicaciones de emergencia (Xiao et al., 2022). Continuando con la descripción de SAGIN, la Figura

15 ilustra la clasificación de los tres tipos de redes físicas según altitud, y se añadieron los nombres mencionados por la literatura con el fin de ubicar espacialmente cada una. A su vez, la Figura 15 ilustra las distintas capas de la atmósfera y la “línea de Karman”, la cual sirve como referencia para diferenciar las plataformas aéreas de las espaciales. Se observa una aproximación del “espesor” de cada capa atmosférica, 12 km para la tropósfera, 50 km de la estratósfera, 80 km de la mesósfera y 400 km de la termósfera, la exósfera es la capa exterior y la que no cuenta con un espesor delimitado. Mientras que  $h$  es la altura designada por plataforma.



**Figura 15** Clasificación de redes según altitudes de acuerdo con los enfoques propuestos en la literatura.

## 2.6 Normatividad, regulaciones y estándares

Los estándares, regulaciones y normativas son herramientas esenciales para asegurar la calidad, seguridad y eficiencia en diversas industrias y actividades. Aunque a menudo se utilizan de manera intercambiable, tienen diferencias específicas en su propósito y aplicación. Los estándares son criterios, especificaciones o directrices desarrollados por organizaciones de estándares, que definen las mejores prácticas y los requisitos técnicos de un producto, servicio o proceso. Generalmente, son de carácter voluntario y pueden ser utilizados como referencia por las empresas para mejorar la calidad y consistencia. Por otro lado, las

regulaciones son reglas obligatorias establecidas por organismos gubernamentales o autoridades competentes que deben cumplirse por ley. Se implementan para proteger la salud, la seguridad, el medio ambiente y los intereses de los consumidores, asegurando que las actividades y productos cumplan con requisitos mínimos establecidos. Las normativas, por su parte, son un conjunto de reglas y procedimientos que pueden incluir tanto estándares como regulaciones, adoptados para guiar y controlar comportamientos y prácticas dentro de un sector específico; su obligatoriedad puede variar dependiendo del organismo que las emita.

Respecto a los HAPS, que se encuentran en fase de investigación y desarrollo, existe la iniciativa internacional por adaptarlos al marco regulatorio lo antes posible. En esta década, se han aumentado los esfuerzos por estandarizar las plataformas aéreas e investigar el impacto de sus aplicaciones. Esto se debe a que la normatividad y regulaciones garantizan la soberanía del espacio aéreo, la seguridad de las operaciones aéreas, previenen interferencias en el espectro y definen el diseño de la arquitectura de la red. Además, permiten el uso seguro y eficiente de las plataformas respecto al riesgo que conlleva realizar operaciones sobre zonas pobladas, protegiendo los intereses y bienes nacionales y ciudadanos (HAPS Alliance, 2024) se supervisan tanto a nivel regional como internacional.

En México, la Ley de Protección del Espacio Aéreo Mexicano regula el espacio aéreo, mientras que, en el ámbito internacional, la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) se encarga de las regulaciones aeronáuticas, enfocándose en el monitoreo de plataformas, actualización de las cartas de navegación y restricciones en el espacio aéreo. La OACI, junto con UIT-R y 3GPP, hace hincapié en la interferencia entre sistemas de comunicaciones, un factor clave para la compatibilidad entre los segmentos físicos de red. Es importante destacar la iniciativa *HAPS Alliance*, que fomenta la colaboración entre agentes de diversos sectores, con el objetivo de *“investigar, desarrollar y poner en marcha un ecosistema sólido e interoperable de tecnologías HAPS que beneficie a personas e industrias de todo el mundo”* (HAPS Alliance, 2020).

### 2.6.1 Aspectos normativos de aeronáutica

La visión y tendencia de las plataformas aéreas es ser autónomas con mínima supervisión humana. En este contexto, la OACI ha establecido una terminología específica dentro del marco normativo internacional, definiendo dos categorías de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS): globos libres no tripulados y aeronaves no tripuladas (2015). Es fundamental establecer un control adecuado en el espacio aéreo correspondiente para mantener el orden y control del tráfico aéreo (Karabulut Kurt et al., 2021).

Por lo tanto, para el marco conceptual de esta tesis es imperativo que en México se cumplan las normativas establecidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) para operar un RPAS en el espacio aéreo nacional.

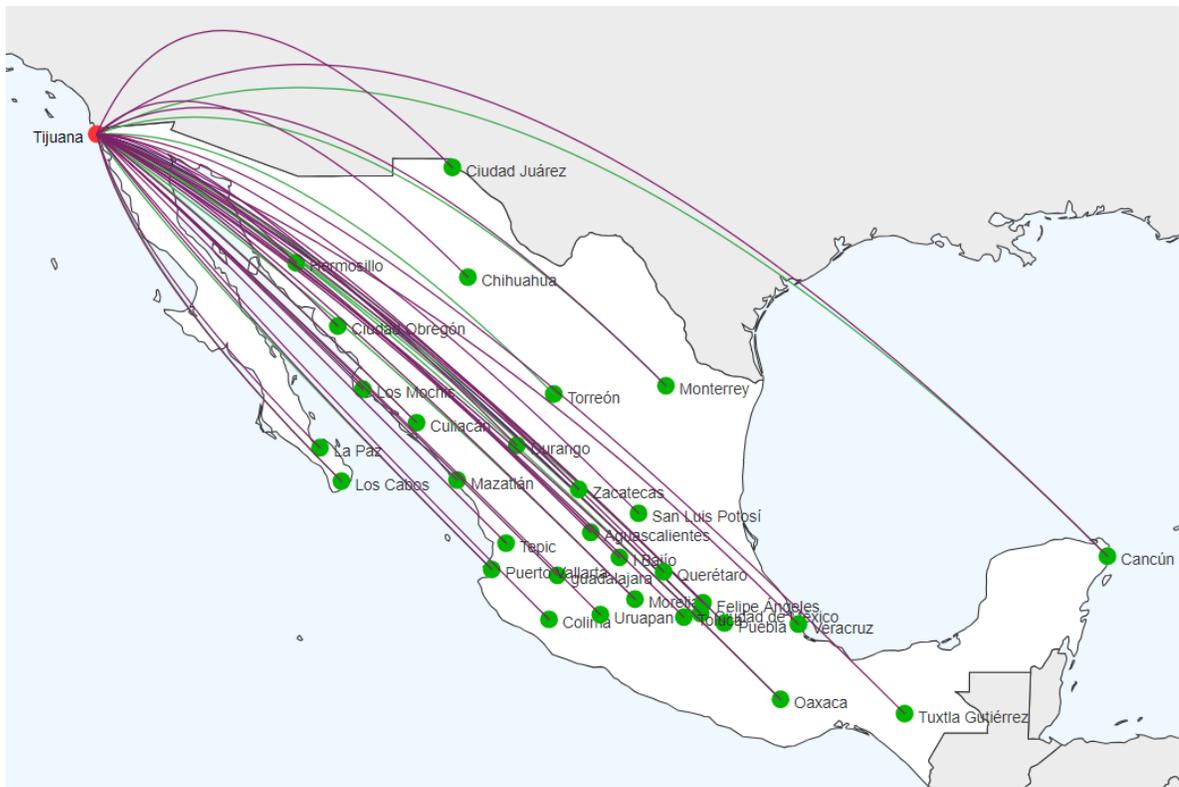
La Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019 detalla los requisitos necesarios para dicha actividad (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019). Esta norma establece estándares para el control y la comunicación de los RPAS, garantizando que operen de manera segura y eficiente. Entre los requisitos se incluyen la certificación del RPAS, la capacitación del operador y el cumplimiento de las regulaciones sobre espacio aéreo y comunicaciones. Esta norma también es aplicable a los aspectos a considerar para la implementación de HAPS/HIBS en caso de que sean clasificados como RPAS; de lo contrario, se deberán observar otros requisitos establecidos por la NOM-012-SCT3-2012 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2013).

La Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC) es responsable de elaborar normativas bajo la SCT y desempeña un papel crucial en la regulación y supervisión de la aviación civil. Su labor incluye garantizar el cumplimiento de normas de seguridad mediante la certificación de aerolíneas, personal aeronáutico y aeronaves. Además, la AFAC investiga accidentes e incidentes aéreos para mejorar la seguridad, gestiona el espacio aéreo para asegurar operaciones eficientes y realiza inspecciones y auditorías a aeropuertos y operadores aéreos. También ofrece programas de capacitación y colabora con autoridades internacionales para mantener altos estándares en seguridad y operaciones.

Las cartas aeronáuticas son mapas especializados que describen rutas de navegación para aeronaves e incluyen información crítica como aerovías, puntos de referencia, altitudes mínimas y máximas, aeropuertos, ayudas radioeléctricas y espacio aéreo controlado. Estas cartas son esenciales para garantizar una navegación segura y eficiente, permitiendo a pilotos y controladores aéreos planificar y ejecutar vuelos con precisión. Proporcionan información detallada y actualizada sobre rutas y condiciones del espacio aéreo, ayudando a evitar colisiones y garantizando vuelos seguros. Además, facilitan la planificación de rutas más directas y eficientes, reduciendo tiempos de vuelo y consumo de combustible. Por último, aseguran que las operaciones aéreas cumplan con las regulaciones nacionales e internacionales, manteniendo coherencia y orden en el espacio aéreo.

Estas cartas enfrentan retos significativos al unificar información de diferentes regiones y países, superando barreras jurisdiccionales y regulaciones locales. Con el avance tecnológico, se mantienen actualizadas con información precisa y relevante. Además, gestionan el creciente volumen del tráfico

aéreo y ayudan a los pilotos a tomar decisiones informadas sobre condiciones meteorológicas y terrenos, contribuyendo a una navegación segura y eficiente. Se recomienda considerar una ruta específica para plataformas aéreas de tipos RPAS, que no interrumpan o influyan en el tráfico aéreo. Se deben diseñar rutas de tráfico aéreo adyacentes de acuerdo con las cartas de navegación aeronáutica que definan el trayecto de RPAS. También debe contemplarse la creación de protocolos de seguridad en caso de que las plataformas deban realizar un aterrizaje de emergencia sin dañar la integridad de los ciudadanos y sus bienes. Otra cuestión es aclarar dónde las plataformas deben realizar sus salidas y llegadas: *¿es viable que lo hagan en aeropuertos civiles o se deben diseñar aeropuertos exclusivamente para las plataformas no tripuladas?*. La Figura 16 ilustra algunas rutas de aeronavegación con origen en Tijuana al resto del país.



**Figura 16** Mapa de rutas aéreas comerciales del aeropuerto de Tijuana. Se observa una condensación de las rutas debido a la posición geográfica de la ciudad situada en el extremo noroeste del país (nextSvg, 2024).

En México, hay un total de 76 aeropuertos registrados por la AFAC. Además, existen 40 aeródromos no comerciales y 16 bases aéreas de la Fuerza Aérea Mexicana. En total, México cuenta con 1714 pistas aéreas visibles desde el cielo, aunque solo 243 de ellas están pavimentadas. Los aeródromos capaces de recibir globos aerostáticos deben cumplir con ciertas especificaciones para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones. Según la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCT3-2002 (Secretaría de Comunicaciones y

Transportes, 2003), estos aeródromos deben contar con áreas de despegue y aterrizaje adecuadas, libres de obstáculos y con suficiente espacio para maniobrar.

Asimismo, deben disponer de instalaciones para el almacenamiento y mantenimiento de los globos, así como personal capacitado para supervisar las operaciones. Es crucial que estos aeródromos cuenten con los permisos otorgados por la AFAC y que las empresas operadoras cumplan con los requisitos de seguridad establecidos. Esto incluye poseer seguros que cubran posibles daños a pasajeros o terceros y asegurar que el personal encargado tenga las licencias y certificados necesarios.

## 2.6.2 Aspectos normativos de las comunicaciones

El radioespectro es un recurso limitado asignado en bandas de frecuencia según estándares internacionales de la UIT-R y regionalmente por la IFT. En la reunión de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del 2023 (CMR-23), se asignaron nuevas bandas de frecuencia para las tres regiones, incluyendo la Región 2 (Américas), donde México forma parte. En la Tabla 2 se resumen estos resultados.

**Tabla 2** Asignación de frecuencias por la CMR-23 (Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2023).

Banda	Tipo	Rango de frecuencia
		698 – 728 MHz
	Enlace de subida	805.3 – 806.9 MHz
694 – 960 MHz		830 – 835 MHz
		728 – 805.3 MHz
	Enlace de bajada	806.9 – 830 MHz
		835 – 960 MHz
1.7 – 2.1 GHz	Enlace de subida	1.71 – 1.785 GHz
	Enlace de bajada	1.785 – 1.98 GHz
		2.11 – 2.16 GHz
2.6 GHz	Enlace de subida	2.5 – 2.51 GHz
	Enlace de bajada	2.51 – 2.69 GHz

Como parte de este trabajo, se analizó el traslape de las frecuencias según el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias en México (CNAF), publicado por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (Instituto Federal de Telecomunicaciones, 2024a), el CMR-23 (Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2023) y 3GPP (2024). En la Figura C - 1 en Anexos, se observan segmentos del espectro dedicados a

radioenlaces de subida (tierra-aire) y bajada (aire-tierra). Estos segmentos de frecuencia son los mismos que utilizan los equipos celulares públicos, lo cual es relevante para el diseño de nuestra red.

Este segmento del CNAF tiene mayor peso para la asignación regional. La banda n256 es parte de las frecuencias para NTN, que se traslapa con el CNAF en la aplicación de servicio móvil terrestre y satelital, aunque la banda de la CMR-23 no lo hace. Se recomienda esperar hasta que el IFT se pronuncie sobre las bandas de frecuencia asignadas específicamente para HIBS. Por ello, en esta tesis se realizó una tabla comparativa entre bandas según la asignación hecha por las tres entidades: IFT, 3GPP y UIT-R.

Para las frecuencias utilizadas en enlaces de pasarela, se están determinando las más adecuadas para las diferentes regiones de la UIT-R. El CNAF asigna frecuencias superiores a los 6 GHz para enlaces fijos espacio-tierra, pero no para enlaces aire-tierra, lo que genera ambigüedad sobre las frecuencias utilizables en estos casos. Aun así, la recomendación F.1500 (Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2000) asigna las frecuencias de 47-48 GHz para HAPS, aunque estos enlaces pueden ser altamente atenuados por condiciones climáticas en las regiones pluviales de México.

En cuanto a la regulación de HIBS, México está trabajando en la implementación e integración de estas plataformas con las redes terrestres. Se han realizado reuniones con empresas privadas para discutir el futuro y la visión de las plataformas HIBS. Como se mencionó en el apartado 2.6.1, se debe esperar a que el IFT regule los HIBS de acuerdo con las bandas de frecuencias, especialmente en el tema de interferencia con los operadores móviles.

Mientras tanto, en la CRM-23 se discutieron nuevas asignaciones de bandas en el radioespectro para su integración con las NTN y la tecnología New Radio en la RAN, que además de proveer servicio móvil, darán cobertura a dispositivos del IoT (Euler et al., 2022; Iskandar et al., 2022). A continuación, se dará preámbulo a las NTN y su función en el ecosistema 5G.

## Capítulo 3. Diseño de enlaces de radiofrecuencia sobre HAPS

---

Para diseñar un despliegue de comunicaciones inalámbricas capaz de transmitir hacia un receptor fijo se debe establecer un método de predicción y modelado de canal. Los principales efectos que se presentan en la transmisión de señales por radiofrecuencia (RF) durante su propagación por espacio libre, tales como la reflexión, difracción y dispersión que sufren las ondas electromagnéticas, son bien conocidos y ocasionan la disminución en la calidad del canal, llamada atenuación. En este capítulo se hace una descripción de los radioenlaces que se encuentran en los sistemas de comunicaciones aéreas, analizando los efectos en el presupuesto del enlace causados principalmente por la frecuencia del radioenlace, así como por las condiciones de lluvias extremas en determinadas regiones geográficas, que llegan a afectar la calidad del canal.

Con respecto a la tecnología 5G NR, fue diseñada para reducir la latencia, optimizar el uso energético y soportar aplicaciones críticas en tiempo real, garantizando una alta fiabilidad en la transmisión de datos y mejor uso de la energía. La 5G NR está relacionada estrechamente con la RAN, la cual proporciona un marco flexible y robusto para la conectividad móvil, adaptándose a una amplia gama de aplicaciones y requisitos de red, desde el Internet móvil de alta velocidad hasta las comunicaciones ultra fiables y de baja latencia para aplicaciones industriales y críticas, donde las antenas MIMO transmiten y reciben simultáneamente mediante múltiples haces, incrementando la capacidad, el rendimiento y el consumo energético de la red al aumentar la eficiencia espectral.

Una característica destacada de la 5G NR es su flexibilidad en el ancho de banda, permitiendo el uso de anchos de banda variables, desde unos pocos megahertz (MHz) hasta varios cientos, adaptándose a las necesidades específicas de cada caso de uso para diferentes servicios y escenarios. Gracias al uso de técnicas avanzadas de codificación y modulación, combinadas con la SDN permite crear múltiples redes virtuales sobre la misma infraestructura física, mejorando aún más la reducción en latencia y la eficiencia de la transmisión de datos en el sentido general.

### 3.1 Elementos del sistema

Una red aérea de comunicaciones 5G está constituida por varios elementos, incluyendo al usuario y su equipo, la plataforma que proporciona acceso a la red (plataforma aérea, estación base terrestre

encargada de repetir o regenerar la señal), y finalmente al *gateway* encargado de dar salida, procesar e interconectar la información requerida por la aplicación de la red. Por otro lado, el 5GC es el componente central de la red 5G que habilita funciones avanzadas como la conectividad ultra fiable y de muy baja latencia, conectividad masiva de dispositivos y servicios de gran ancho de banda. A su vez, el 5GC habilita el uso de operaciones en la parte lógica de la red digital como asignación de políticas de seguridad, selección de segmentos de red, índices de QoS y QoE, almacenar información del suscriptor, gestionar sesiones, entre otras.

5GC es el cerebro detrás de la conectividad 5G, su *“arquitectura basada en servicios”* se encuentra conformada por una *“infraestructura de virtualización de funciones de red”* lo que lo hace un núcleo de red versátil impulsado por software. Su flexibilidad, escalabilidad y seguridad mejorada lo convierten en una tecnología esencial para respaldar la creciente complejidad y variedad de dispositivos y servicios conectados en el panorama digital actual.

Una de las características destacadas del núcleo de red 5G es la segmentación de red como se mencionó anteriormente, la cual permite a los operadores de red dividir una única red física en múltiples redes virtuales, cada una optimizada para diferentes tipos de servicios. 5GC tiene una arquitectura nativa en la nube, que facilita la computación de borde y acerca la computación y el almacenamiento de datos al lugar físico donde se precisan, al contrario de depender únicamente de centros de datos centralizados. Esto es bastante útil para aplicaciones que requieren procesamiento en tiempo real, como la realidad aumentada en eMBB, la IoT industrial en mMTC, y la atención médica en uRLLC.

Por otra parte, el 5G NR es la tecnología de acceso de radio desarrollada específicamente para 5G. Establecida por un grupo de estándares que definen las redes inalámbricas globales de próxima generación, donde fueron diseñados para hacer un uso más eficiente de la infraestructura existente y capacidades de las redes móviles, ofreciendo mayores ventajas que redes previas 4G LTE. La red 5G se puede desplegar y operar ya sea en modo autónomo (Stand Alone, SA), o en modo no-autónomo (Non-Stand Alone, NSA).

Ambos modos utilizan la interfaz NG-RAN (*Next Generation-Radio Access Network*) que ofrecen tanto ventajas como desventajas en su infraestructura y conectividad de redes al migrar de 4G a 5G, ya sea en aspectos operativos y de interconexión, así como en los costos asociados a cada uno. También, es responsable de la transmisión y recepción de datos entre la BS LTE y el 5GC, y está conectada al 5GC a través de la interfaz NG. En resumen, el modo NSA es una arquitectura de transición a 5G desde una

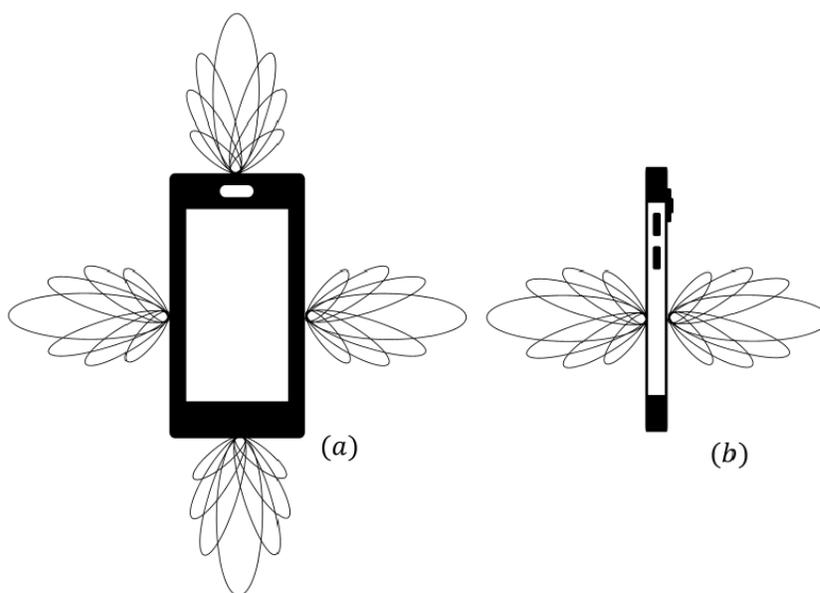
infraestructura 4G LTE combinando elementos de ambas redes, mientras que el modo SA es una arquitectura con la mayoría de sus elementos de una red 5G (ETSI, 2025d).

Pasando al concepto NR, utiliza un paquete de tecnologías avanzadas de acceso por radio, por ejemplo, la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), divide las señales en múltiples subportadoras ortogonales que permiten una transmisión de datos más robusta y eficiente similar a la empleada en redes 4G, pero con mejoras significativas. También, la NR puede operar de manera dinámica en Duplexación por División de Tiempo (del inglés *Time Division Duplexing*, TDD) como de Duplexación por División de Frecuencia (del inglés *Frequency Division Duplexing*, FDD), proporcionando flexibilidad en el uso del espectro, y a su vez, maximizando el rendimiento y cobertura del servicio.

Además de lo anterior, NR utiliza arreglos de antenas que permiten el uso de conformación de haces masivos de radio con Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO Masivo), en celdas más pequeñas; todo esto conforma el ecosistema 5G y, por lo tanto, deberá ser montado por igual o con modificaciones sobre redes aéreas. Por esto mismo, se dará una breve descripción de los elementos del sistema junto con los parámetros utilizados para el presupuesto de enlace en base al marco de la 5G NR (ETSI, 2025b).

### 3.1.1 Equipo de usuario

El término “*equipo de usuario*” describe la terminal que el usuario utiliza para realizar la comunicación con la red, y abarca los modelos como radios de mano, celulares móviles, antenas de barcos, sensores o computadoras portátiles. Generalmente en la terminología 5G el UE suele ser un dispositivo inteligente o un dispositivo para IoT, el cual solicita a la red que se le asigne una sesión con los recursos adecuados a su servicio. En este trabajo se considera dicha terminal con parámetros ideales de acuerdo con las recomendaciones por la 3GPP (ETSI, 2024), donde uno de estos parámetros es el patrón de radiación que radia la antena del dispositivo, que idealmente se considera isotrópica con ganancia constante. Existen varias tecnologías para la conformación de haces de RF, tanto fijos como dinámicos, y con circuitos digitales, analógicos, o mixtos, las cuales caen fuera del enfoque de este trabajo. En la práctica, las terminales UE cuentan con múltiples antenas con haces dinámicos, como se realizó en la Figura 17.



**Figura 17** Haces de radiación de un dispositivo inteligente con antenas para ondas milimétricas, (a) vista frontal, (b) vista lateral.

Por el lado del procesamiento lógico de la red, se crea una sesión del UE que es solicitada al 5GC, donde se le asignan recursos de acuerdo con el tipo de servicio, demanda y restricciones del operador móvil. Si bien hay una gama de diferentes parámetros mínimos para cada escenario, se generalizará el servicio proveído mediante una suposición de los parámetros constante. Ya que la red asigna dinámicamente los recursos de acuerdo con factores como tráfico, frecuencia, ancho de banda, potencia recibida y latencia de la red por mencionar algunos. Para el presupuesto de enlace del elemento se utilizaron los parámetros de la Tabla 3.

**Tabla 3** Descripción de dispositivos 5G.

Dispositivos de mano o IoT	
Potencia de transmisión	100 mW
Tipo de antena	Omnidireccional

### 3.1.2 Estación base como nodo repetidor

Para comenzar, el concepto de Estación Base (o *Base Station*, BS) no solo se encarga de brindar cobertura en las redes terrestres, también es utilizada en redes aéreas como los es HIBS. Por lo que, este trabajo cuando menciona a una BS se refiere específicamente aquella que se encuentra en el suelo y corresponde

a las TN. Para calcular la distancia de cobertura de una estación base es necesario tener en cuenta las condiciones geográficas y urbanísticas de la zona, algunos métodos de modelos principales se dividen en cuatro: zonas urbanas densas, zonas urbanas generales, suburbios, y zonas rurales. Otros temas que deben tenerse en cuenta también son los requisitos de capacidad y los requisitos de velocidad en los bordes de la cobertura (incluidos los requisitos de velocidad de enlace ascendente y descendente (para escenarios que usan FDD) y la relación de fotogramas o “frames” del tiempo entre el enlace ascendente y descendente (para escenarios que usan TDD)).

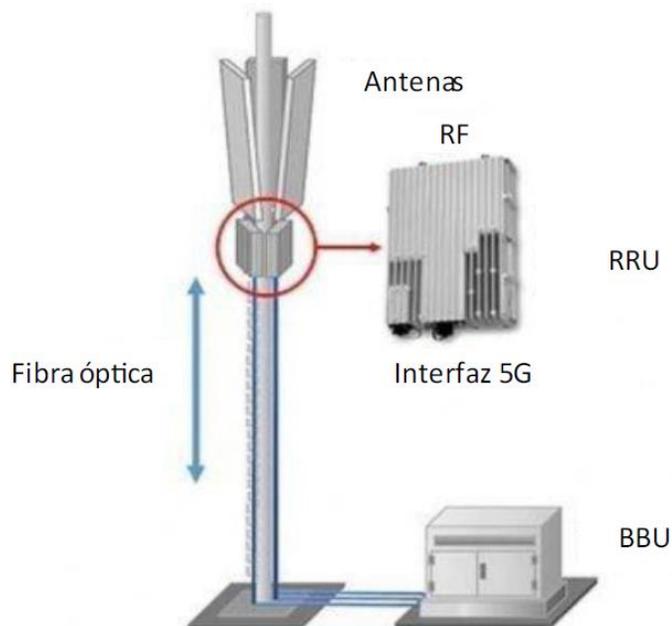
En la actualidad, las BS se instalan principalmente en zonas urbanas dependiendo de la demanda de red, dichas zonas son cubiertas por un círculo de 500 m diámetro, y en las zonas suburbanas es de 1.5 km generalmente. En cuanto a algunas zonas rurales, debido a la densidad de usuarios las BS son repartidas a unos 5 kilómetros de diámetro, mientras que en ciudades de primera categoría es de unos 200 metros. Por otro lado, se considera que la planeación e instalación de gNB (o BS 5G NR) es compleja en comparación de BS 4G LTE, y aunque pueden cubrir cerca de 2 km de diámetro, sus especificaciones técnicas exhiben variaciones dependientes del fabricante del equipo, el escenario específico de despliegue y el operador de la red de telecomunicaciones.

En un despliegue sin importar que sea NSA o SA, las BS están compuestas por una Unidad de Banda Base (*Base Band Unit*, BBU) y una Unidad de Radio Remota (*Remote Radio Unit*, RRU), además de otros componentes interconectados mediante fibra óptica. De manera general, las especificaciones técnicas características de una gNB abarcan aspectos como el soporte de bandas de frecuencia y anchos de banda diversos, compatibilidad con multiplexores, flexibilidad operativa, capacidad de transmisión de potencia dinámica, y elevada eficiencia energética entre otros más (ETSI, 2024).

También existe la versión de despliegue móvil, la cual es desplegada en situaciones de emergencia o en eventos de mucha afluencia para soportar tráfico pesado, pero por periodos corta o mediana duración. Eventualmente están equipadas con antenas adicionales para comunicarse entre estaciones, para evitar el transporte por fibra óptica (después del BBU) o en su defecto, para mantener una ruta alterna cuando la vía terrestre se pueda ver afectada.

Para este despliegue se considera que va equipada con una antena adicional orientada hacia el espacio para establecer comunicación aérea sirviendo como un Nodo Repetidor o RN (*Relay Node*) que maximiza la señal con el UE. En un escenario práctico, la BS como RN deberá ser actualizada con dicha antena, lo

que conlleva a un gasto económico que se debe considerar. Los parámetros que se utilizarán en este trabajo para el diseño del presupuesto de enlace se muestran en la Tabla 4.



**Figura 18** Estación base contemporánea para red 5G (Agrawal, 2018).

El tipo de antena que muestra la Tabla 4, es utilizado tanto para transmitir al usuario como a la plataforma aérea, esto por simplificar el análisis, ya que existe un campo dedicado para esta área en específico y aún no es de conocimiento público cual es la antena adecuada para el último tipo de enlace (tierra–aire). Por lo que se tomó la libertad de asumir una antena hipotéticamente ideal para este despliegue de acuerdo con diseños por algoritmos genéticos.

**Tabla 4** Descripción de nodo repetidor 5G.

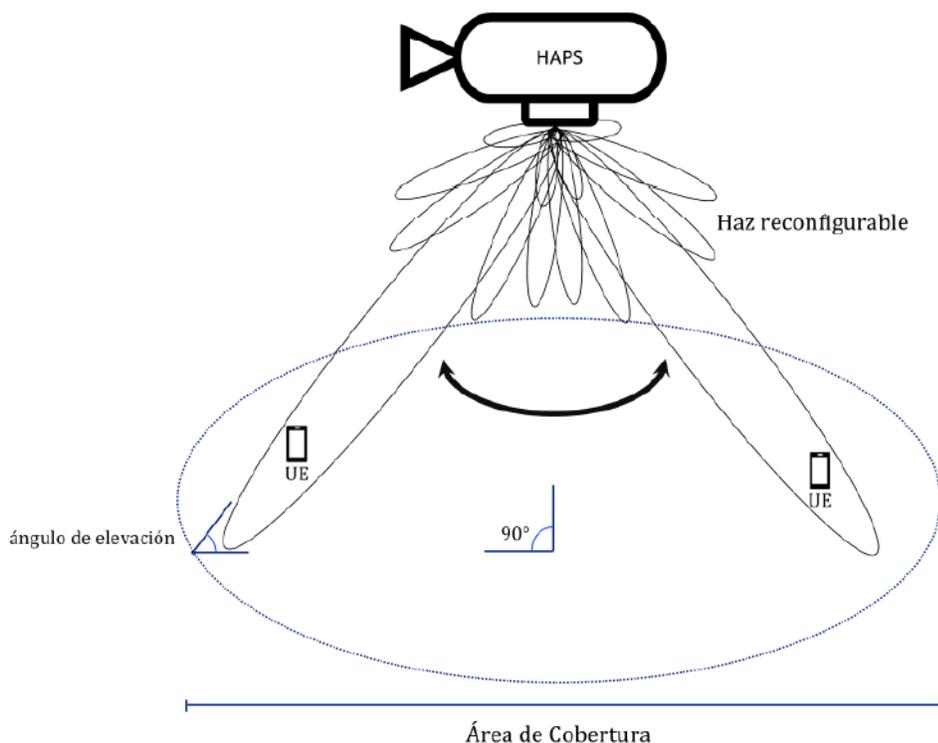
Estación base como nodo repetidor	
Potencia de transmisión	1 W
Tipo de antena	Arreglo de antenas lineal de 8 elementos

### 3.1.3 Plataforma con acceso a la red

A lo largo del trabajo se ha destacado a las plataformas aéreas y su nuevo enfoque de acceso a la red, donde sus ventajas apoyarían al desarrollo de la infraestructura para 5G, sobre todo en México. Si bien el

ecosistema abarca diferentes tecnologías y técnicas, HAPS promete ser un sistema que complemente en la solución de desafíos como la integración con redes terrestres y satelitales. Al ser un punto medio entre las redes del espacio y tierra, tendría algunas de las ventajas de cada una, a su vez trae desventajas como nueva tecnología actualmente en desarrollo.

En este sentido, las redes aéreas son una nueva frontera que necesita atender cuestiones como, configuración de los haces de radiofrecuencia, uso de frecuencias asignadas para enlaces de diferente tipo, procesamiento de la información a bordo, técnicas de acceso múltiple, diseño de antenas, diseño aeronáutico, métodos de control aéreo, soporte para aumentar la capacidad de tráfico e interferencias entre celdas, por mencionar algunos. En este subtema, se pretende presentar el enfoque teórico ideal de la reconfiguración de haces que proporcionarían acceso a la red para diseñar de manera general el despliegue posible con estas plataformas, como muestra la Figura 19.



**Figura 19** Interpretación de configuración de haz a bordo de plataforma con un arreglo de antenas.

La plataforma no se encuentra del todo en un punto fijo sobre la superficie de la tierra, sino que es cuasi-estacionaria volando a una altitud entre 20 y 23 km, contenida en un cilindro vertical hipotético de 1 km de longitud y 2 km de radio. Este cilindro ayuda a enfocar el haz general (haz amplio) del arreglo de antenas dentro del área de cobertura sin que se pierda la comunicación, mientras que sus haces puntuales (haz

angosto) deberían ser capaces de seguir dinámicamente e interactuar con el usuario en todo momento. En la literatura se extiende la posibilidad de realizar la teselación de celdas bajo la plataforma aérea para el reuso dinámico de frecuencias, aunque en este caso esta operación no se realizó para simplificar su análisis ya que involucraría añadir movilidad a plataforma y usuarios, y, por lo tanto, se saldría del enfoque establecido de los objetivos del trabajo.

Una ventaja en el despliegue físico de infraestructura de redes aéreas es que utiliza su posición de gran altitud para extender las aplicaciones y posibles escenarios donde las demás redes puedan presentar dificultades, tales como el acceso a zonas remotas o la interrupción del enlace por efectos atmosféricos, además de extender la cobertura de los servicios. Los HAPS pueden ser utilizados como nodo para las funciones de red de retorno (*backhaul*) en coexistencia con otras TN y/o proveer servicio directo al usuario. Para finalizar, los parámetros para este despliegue se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5** Descripción de plataforma aérea.

Plataforma aérea	
Potencia de transmisión	1 W (BS y UE) y 10 W (HAPS y GW)
Tipo de antena	Arreglo de antenas lineal de 8 (BS y UE) y 16 (HAPS y GW) elementos

### 3.1.4 Gateway

Anteriormente se mostró que una estación base tiene una torre donde se montan las antenas que conectan al usuario con el 5GC. Otro elemento del despliegue es el *Gateway (GW)*, este es una terminal terrestre con conexión por fibra óptica hacia el núcleo de la red, para lo cual debe tener un enlace con suficiente ancho de banda para soportar todos los datos transmitidos simultáneamente por los usuarios. También, funciona como un nodo de conexión de las señales inalámbricas de la BS, donde el GW transfiere la información a través de una red local (hogar, escuela, industria) mediante señales de RF de tipo Wi-Fi, Bluetooth, o cualquier otra al UE.

El *Gateway* no solo se encarga de recibir la información del tráfico, también puede procesar la señal, conmutarla, enrutarla, traducirla a diferentes protocolos para comunicación entre diferentes redes, integrar aplicaciones y realizar el cambio de RF a óptico, en caso de que la infraestructura esté enlazada por fibra óptica. Por lo general se encuentra en un punto estático sobre el suelo, y puede estar cercano al

5GC ya sea privado (empresas privadas) o público (Internet), su tarea primordial es interconectar el gran flujo de datos que proviene de la red 5G para que sean canalizados al UE.



**Figura 20** Antena parabólica con polarización doble de alto rendimiento de frecuencias 5.85-7.2GHz, con aplicación de *gateway* para enlaces de pasarela y, a su vez con la función de 2x2 MIMO (Sanny Telecom, 2024).

Existen diferentes diseños físicos de antenas con aplicación de GW u otras aplicaciones específicas, pueden ser antenas “*parabólicas*” para comunicaciones satelitales, antenas “*yagi*” para recepción de Internet o de tipo “*dipolos*” para comunicaciones de radiofrecuencia o “*arreglos de antenas*” para todos los usos antes mencionados, cada una con sus características que permiten enlaces de buena calidad de canal.

**Tabla 6** Descripción de *Gateway*.

<i>Gateway</i>	
Potencia de transmisión	10 W
Tipo de antena	Arreglo de antenas lineal de 16 elementos

Es importante mencionar que, la Figura 20 muestra una antena real utilizada en *backhaul* o específicamente enlaces tierra-tierra, sin embargo, es un buen ejemplo de antena que transmiten ondas milimétricas; existen varias propuestas de antenas para aplicaciones relacionadas con HAPS bajo este rango de frecuencias, pero, aún no existe estándar que haya sido implementado todavía. Para terminar, el trabajo consideró los parámetros que se muestran en la Tabla 6.

## 3.2 Tipos de enlaces

Una vez identificado los elementos que componen al despliegue de este trabajo, es importante decir que los nombres de los enlaces que conectan a los elementos dependen del criterio de instituciones que los regulan, por lo que se optó por utilizar la misma terminología que en los enlaces de acceso satelital con algunos añadidos, debido a que la arquitectura 5G emergente añade más capas de complejidad y distinción.

### 3.2.1 Enlace de servicio

El enlace de servicio o “*service link*” es el encargado de transportar información de la aplicación o servicio entre el UE y la plataforma o BS. Dado que el enlace *Directo-a-Dispositivo (Direct to Device, D2D)* es un término que se aplica en la literatura para diferentes situaciones, en este trabajo se definirá como *Enlaces de Servicio D2D* tanto a los enlaces HAPS – UE, como a los enlaces RN – UE. Para 5G NR y servicios móviles en general se utilizan las frecuencias debajo de 2 GHz para dispositivos de mano o *handheld*, aunque pueden variar dependiendo del tipo de aplicación y de las regulaciones nacionales o regionales que para el uso de radiofrecuencias.

Se considera que cada enlace vertical tiene características afines a los recursos disponibles en base al servicio proveído ya que, por ejemplo, la transmisión de video en directo no consume los mismos recursos que la de voz. Por lo general, estos parámetros se establecen mediante los índices de QoS, pero dependiendo del operador móvil y de su capacidad de red, puede que lo haga orientado al “Mejor Esfuerzo o *Best Effort*”, de acuerdo con el usuario.

### 3.2.2 Enlaces inter-plataforma

Los enlaces que unen a una plataforma aérea con otra (HAPS – HAPS), de acuerdo con la literatura es definido como enlace inter-plataforma (*Inter-Platform Link, IPL*). Estos tipos de enlaces horizontales se pueden realizar tanto en enlaces de RF, como en las bandas de frecuencias ópticas mediante el uso de dispositivos y subsistemas de *Óptica por Espacio Libre (Free Space Optics, FSO)*. Las tecnologías de FSO transmite haces de laser en frecuencias mayores a los 300 GHz, hasta los THz, con longitudes de onda entre los 780 y los 1550 nm, lo que la hace muy sensible a las pérdidas por propagación y a la atenuación

atmosférica, además de que requiere una alineación precisa entre el transmisor y el receptor prescindiendo del control de movilidad.

Se ha propuesto que estos enlaces puedan ser mixtos entre RF/FSO que cambien de acuerdo con el rendimiento de la red (Yahia et al., 2022), sin embargo, por practicidad y para simplificar este despliegue, se utiliza solamente enlaces de RF por ondas milimétricas. Tiene características muy parecidas a los enlaces *backhaul*, ya que deben ser capaces de transmitir un alto volumen de datos a gran velocidad. Una de las ventajas del ambiente estratosférico es la continuidad de línea de vista altamente probable (>99%), además de que la misma composición química de la atmósfera disminuye la atenuación del enlace debido a los gases atmosféricos (Lou et al., 2023). Estos enlaces son de especial interés debido a sus características de los enlaces que permitirían aumentar las capacidades de rendimiento la red en constelaciones HAPS, por lo que en este trabajo se analiza el impacto de las pérdidas por propagación en estos enlaces.

### 3.2.3 Enlace de pasarela (*backhaul*)

Por último, el enlace de pasarela o *backhaul* hace referencia a un “*viaje de ida y vuelta*”, o llámese de otra manera “*la ruta que sigue la información donde fue enviada como recibida*”. Se usa este término para describir el enlace de mayor capacidad, donde la información de los usuarios viaja en conjunto en un mismo canal y que pueden ir desde HAPS – RN y de HAPS – GW, conectando entre la red aérea y la terrestre en este despliegue. Como los IPL, se propone que sean con tecnología mixta entre RF/FSO para obtener un mejor rendimiento en la red, en cambio al ser un enlace vertical se encuentra con atenuaciones por fenómenos climatológicos. En momentos de emergencia donde caigan hidrometeoros (lluvia, granizo, nieve, etcétera) y se vea afectado el enlace, pueden ser motivo de interrupción en los servicios en toda la red, por lo que se debe de contar con múltiples GW o diseñar un enlace con resiliencia a dichas atenuaciones.

Si bien, el enlace de servicio también debe ser resiliente, el enlace *backhaul* es prioridad para que no se detenga el flujo de información a todos los usuarios por igual. Por esta razón y como lo indican los estándares de 5G NR, este enlace utiliza OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) como técnica de transportación de datos y de acceso múltiple, sin embargo, este trabajo se concentra en el análisis de despliegues aéreos bajo condiciones climatológicas adversas, con una perspectiva desde el diseño de presupuesto de enlaces. Como se mencionó anteriormente, el enlace de *backhaul* debe tener mayores parámetros de ancho de banda y velocidad de bits que los enlaces de servicio, por lo que se

consideró con el fin de simular un enlace de alta capacidad dentro de este despliegue, se vea reflejado lo más acertado posible y observar las afectaciones por atenuación en diferentes escenarios.

### 3.3 Modelo de canal HAPS

El ambiente de propagación (aire) presenta fuertes retos a las comunicaciones inalámbricas ya que no siempre se tienen las mismas condiciones ambientales, cambiando de manera dinámica los factores que afectan la calidad del canal. Esto es importante para determinar si se cumplen o no los requisitos de servicio al usuario, buscando un enfoque que permita aproximarse a las condiciones que podría presentar el ambiente de propagación en relación con la geografía mexicana. Existen intervalos de frecuencia que pueden ser afectados significativamente debido a su longitud de onda, la cual presenta el fenómeno de absorción por gases atmosféricos además de otras atenuaciones que pudiesen ser insignificativas. De esta idea, parte el análisis que se realizó en este trabajo.

#### 3.3.1 Modelo de propagación en el espacio libre

Una característica de los HAPS es que permite contar con una alta probabilidad de línea de vista entre la UE y la plataforma aérea, la cual se lleva a cabo mediante un enlace de radio a través del espacio libre, que tiene un modelo de propagación conocido y confiable. El modelo de propagación en el espacio libre permite predecir la potencia de señal recibida cuando existe línea de vista con el usuario, ya que predice el comportamiento de la potencia recibida de acuerdo con la función de decaimiento de potencia por propagación.

Al ser un modelo idealista, se usa frecuentemente para comunicaciones satelitales por el rango de escala de las trayectorias, aunque no considera los efectos negativos en el enlace causados por dispersión, refracción, o reflexión en las señales, por lo que solo existe en teoría. Aun así, permite predecir la potencia de la señal recibida y brinda una idea del funcionamiento del enlace a diseñar, por lo que será el modelo por usar en este trabajo, y se define en la ecuación (1):

$$FSPL = 92.4 + 20 * \log_{10} f + 20 * \log_{10} dis \quad (1)$$

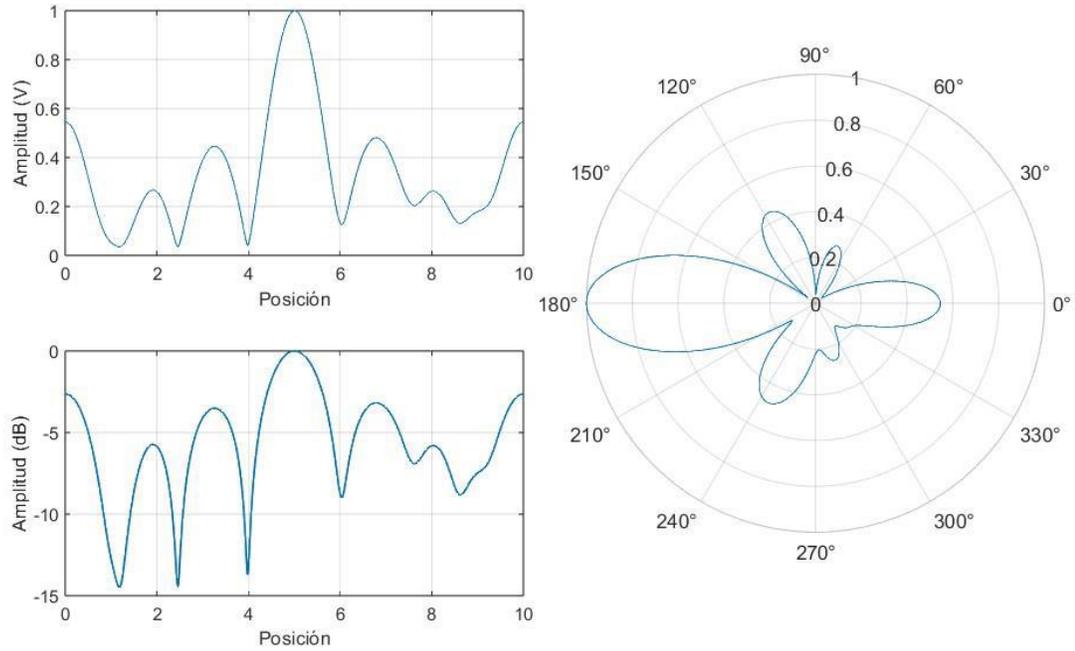
*FSPL* es el acrónimo en inglés de “*Propagación por Trayectoria por Espacio Libre*” (*Free Space Path Loss*),  $f$  es la frecuencia central utilizada para el enlace, y  $dis$  es la distancia de separación entre el receptor y transmisor en km. Si bien la ecuación (1) describe un modelo ideal, es capaz de proporcionar la suficiente información para considerar si el enlace pudiese ser factible o no.

### 3.4 Antenas en los elementos

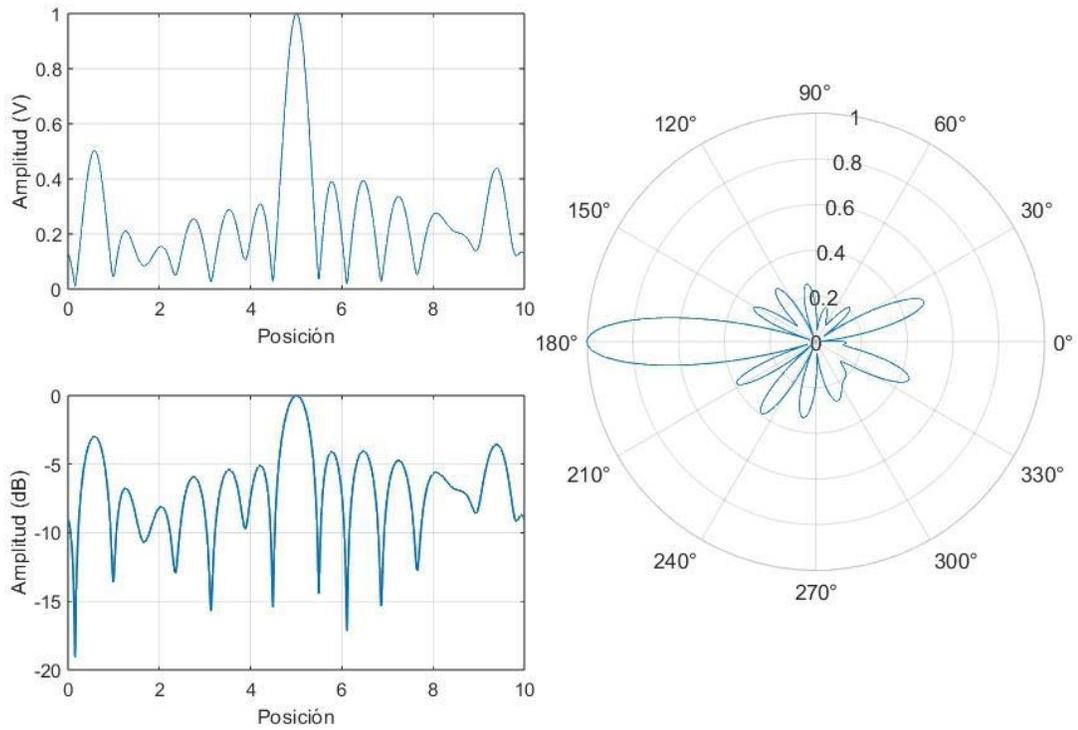
Previamente se habló de los elementos del sistema y de las antenas que son utilizadas como parte fundamental de cualquier red o despliegue inalámbrico, asimismo la tecnología utilizada para aplicaciones LTE y 5G es la MIMO la cual ha evolucionado para proveer a múltiples usuarios al mismo tiempo. En un despliegue 5G se espera un aumento en la magnitud del rendimiento conforme al número de antenas y usuarios, lo que hace difícil validar y gestionar a las antenas de todos los elementos en el entorno dinámico 5G, además de las interferencias entre haces causadas por una evaluación incorrecta del canal o por haces desalineados, dando como resultado una reducción en el QoS y QoE (Nomikos et al., 2013).

En este trabajo se acudió a un algoritmo genético (previamente diseñado como proyecto final de uno de los cursos tomados durante el grado), para mostrar los patrones de radiación de las antenas a bordo de las plataformas aéreas, ya que este programa contiene características propias al problema que resuelve el algoritmo. Aunque no sea una evaluación para antenas MIMO, el algoritmo genético diseña antenas con arreglos lineales de 8 y 16 elementos muy similares a la tecnología MIMO para un solo usuario, cuyos respectivos patrones de radiación se muestran en las Figura 21 y Figura 22, respectivamente. El código que genera ambos patrones se puede encontrar en los Anexos apartado Hipervínculos A.

Al comparar la Figura 21 y Figura 22 se puede notar un aumento en la directividad de la antena, debido al aumento del número de elementos en el arreglo lineal aumentando propiedades como la ganancia recibida, asimismo se busca que sea capaz de atender las necesidades hipotéticas del sistema y funcionamiento estable de los enlaces. Este aumento en directividad y ganancia depende tanto de los valores de amplitud máxima, como de la separación de cada elemento de la antena, lo que se encuentra fuera del enfoque de esta tesis. Sin embargo, se considera importante demostrar el patrón de radiación hipotético de la carga útil o antenas montadas a bordo del HAPS/HIBS, por otro lado, existe varias propuestas relacionado a esta área (Iskandar et al., 2022; Nomikos et al., 2013; Salas-Natera et al., 2022; Thornton et al., 2003).



**Figura 21** Patrón de radiación de un arreglo lineal de 8 elementos.



**Figura 22** Patrón de radiación de un arreglo lineal de 16 elementos.

### 3.5 Pérdidas por atenuación en los enlaces

El cálculo de enlaces de comunicaciones implica la suma y resta en potencia de las señales de radio durante su propagación. En este apartado se definirán los parámetros de atenuación en potencia debido a pérdidas por propagación, pérdidas por lluvia, pérdidas por implementación, pérdidas por borde de cobertura, pérdidas por gases atmosféricos y pérdidas por trayectoria considerados en el presupuesto de enlace presentado. Estas pérdidas son en su mayoría estimaciones bien fundadas de acuerdo con la literatura, y son ampliamente aceptadas en la práctica, cabe señalar que existen más parámetros de atenuación en enlaces atmosféricos de radiofrecuencia que no han sido considerados, debido a su impacto poco relevante en los resultados obtenidos.

#### 3.5.1 Pérdidas por implementación

Las pérdidas por implementación son las atenuaciones adicionales que ocurren debido a la implementación práctica del sistema, más allá de las pérdidas teóricas calculadas, e incluyen factores como la eficiencia de los componentes, las pérdidas en los conectores y cables, y otros factores no ideales que afectan el rendimiento del enlace. Estas pérdidas se consideran en el cálculo del enlace con el fin de visibilizar y contar con una medición más asertiva, y por lo general suelen ser ocasionadas por cables flojos o por el ruido interno de los componentes electrónicos sellados.

Esta atenuación idealmente debería ser igual a 0 dB, pero según la literatura puede alcanzar valores de hasta 5 dB si existe una falla física que comprometa la calidad de la señal. El desgaste que sufren los componentes con el tiempo de uso es otro factor que también puede aumentar las pérdidas por implementación. En este trabajo se consideraron los valores de pérdidas que se muestran en la Tabla 7 para cada elemento de red del sistema, pero al no tener referencias cuantitativas para la atenuación en HAPS, se consideró el valor ideal de 0 dB.

**Tabla 7** Pérdidas por implementación por elemento.

	HAPS	HAPS (IPL)	RN	GW	UE
Pérdidas por implementación	0 dB	0 dB	2 dB	4 dB	2 dB

### 3.5.2 Pérdidas por borde de cobertura

Esta atenuación se presenta al final del área de borde de la cobertura de antena, ya que el patrón de radiación de la antena es constante al ser el total de potencia radiada bajo la curva, por lo que entre más lejos se encuentre el receptor del centro del área de cobertura, se recibe menos potencia y, por lo tanto, el enlace tendrá un menor desempeño. Esto se debe a que la potencia de recepción se reduce por la mayor distancia recorrida en la mayor distancia oblicua (hipotenusa) en el borde del cono radiado desde la plataforma aérea con respecto al centro del mismo cono de radiación (cateto), reduciendo así la densidad de potencia recibida por unidad de área en la antena receptora, lo cual también depende de la tecnología de antena que se encuentre montada. Si bien este dato requiere ser calculado bajo un modelo con valores específicos conforme y dependiente del usuario, para este trabajo se ven de manera general donde cada enlace al borde de cobertura del receptor se le agregan 4 dB de pérdida en el presupuesto del enlace.

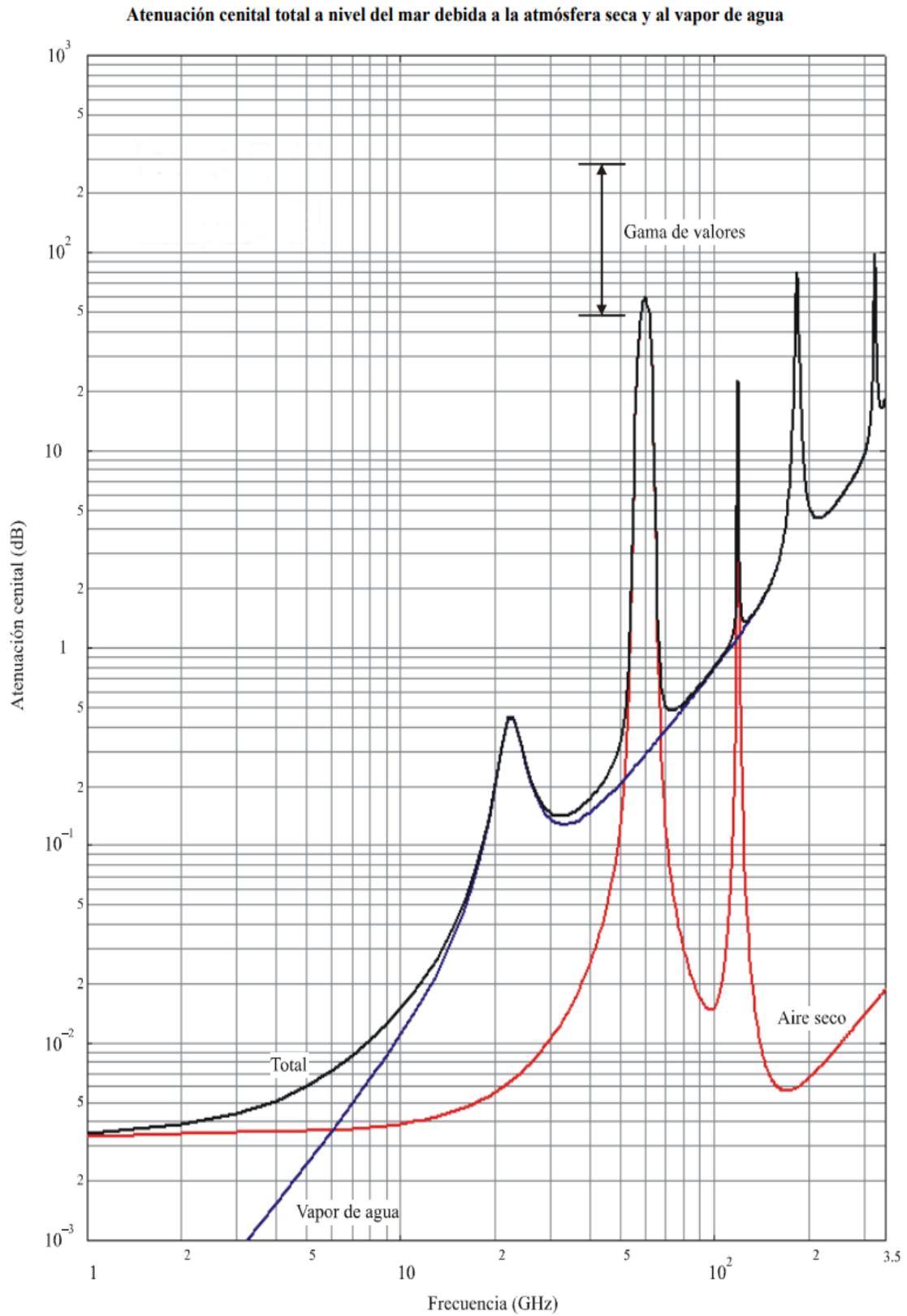
### 3.5.3 Pérdidas por gases atmosféricos

El método que se utilizó para calcular estas pérdidas fue el descrito en la recomendación P.676-7 de la UIT-R (2007), donde se evalúan la atenuación ocasionada por los gases atmosféricos en trayectos terrenales y oblicuos, pero también sirve para calcular enlaces tierra–aire y tierra–espacio. El método allí descrito es aproximado y simplificado, pero es aceptado para evaluar a la gama de frecuencias de 1–350 GHz que muestra la Figura 23, donde se cubren los rangos de frecuencias en enlaces 5G para redes aéreas usando HAPS están entre 1.7–22.9 GHz en base a este análisis.

De acuerdo con esta recomendación, las pérdidas por gases atmosféricos fueron calculadas mediante la ecuación (2):

$$L_g = C_g * dis \quad (2)$$

donde  $C_g$  o “coeficiente de atenuación por gases atmosféricos” depende de la frecuencia central del enlace y se obtiene de la Figura 23, mientras que  $dis$  es la distancia que recorre el enlace durante su trayecto del transmisor al receptor, medida en km.



**Figura 23** Gráfica de atenuación por gases atmosféricos (Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2007).

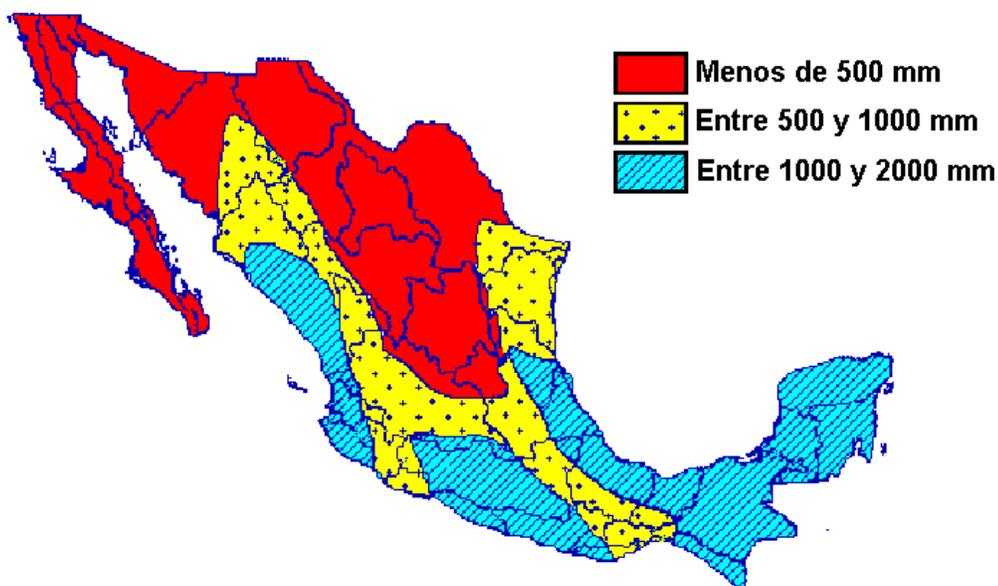
### 3.5.4 Pérdidas por lluvia

El impacto negativo de las pérdidas por lluvia en radioenlaces es causado por fenómenos hidrometeorológicos debido principalmente a la ubicación geográfica de los enlaces. Sin embargo, la tarea de calcular escenarios de atenuación para cada monto de tasa pluvial aumentaría la cantidad de estimaciones por mucho detalle, por lo que se decidió reducir el número de regiones pluviales para este trabajo de tesis. Dicho esto, de acuerdo con la recomendación P.837-1 de la UIT-R (1994), se consideró los valores de intensidad de lluvia en las 3 regiones pluviales principales que presenta el territorio mexicano para cada enlace individual. La Figura 24 presenta la medición promedio anual de lluvia acumulada en las regiones mexicanas, de parte de la Comisión Nacional del Agua (2010).



**Figura 24** Lluvia acumulada promedio anual (Comisión Nacional del Agua, 2010).

Respecto a esta referencia y al trabajo realizado en un curso dentro del CICESE, en conjunto con la recomendación de UIT-R, se utilizó el mapa de las regiones pluviales en México (Conte Galván, 2020) que se muestra en la Figura 25.



**Figura 25** Regiones de precipitación pluvial en México (Conte Galván, 2020).

Las regiones pluviales de la Figura 25 generan las tasas pluviales que se muestran en la Tabla 8. Los valores de las columnas que aparecen en las regiones F, D y G de la Tabla 8 corresponden a la medición promedio de intensidad de lluvia extremas que se encuentran al norte y sur principalmente.

**Tabla 8** Tasas pluviales de las regiones en México.

Interrupción	F (mm/hr)	D (mm/hr)	G (mm/hr)	Tiempo de interrupción
0.001%	65	110	185	5.26 min
0.01%	25	50	95	52.6 min
0.1%	5	15	30	8 hr y 46 min
1%	0	5	10	87 hr y 40 min

Los valores de interrupción que aparecen en la primera columna de la tabla 8 indican el porcentaje de interrupción al año del enlace de comunicaciones debido a atenuación por exceso de lluvia, donde el enlace puede ser interrumpido completamente por la cantidad de lluvia, como indica la ecuación (3)

$$\% \text{ Disponibilidad} = (1 - \text{Interrupción}) 100 \quad (3)$$

La disponibilidad estimada de la red se refiere entonces a cuánto tiempo (o porcentaje de cada año) estará utilizable el enlace de comunicaciones en base a su tasa pluvial geográfica, y su complemento será el tiempo (o porcentaje al año) que se cae el enlace por efectos negativos de la lluvia. Una vez identificadas las regiones se utiliza la ecuación (4) descrita en la recomendación.

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (4)$$

Donde  $\gamma_R$  (dB/km) es la atenuación específica que se obtiene a partir de la intensidad de la lluvia  $R$  (mm/h) mediante la ley exponencial. Los valores  $k$  y  $\alpha$  dependen de la frecuencia, polarización y trayecto horizontal, y se obtuvieron con el programa de la UIT-R (2007). Por ejemplo, el 0.001% de los 365 días del año, y dependiendo de la tasa de lluvia en cada región pluvial, el enlace sólo se interrumpe 5.26 minutos al año por culpa de la lluvia, de acuerdo con la Tabla 8.

### 3.5.5 Pérdidas por trayectoria

Las pérdidas por trayectoria se refieren a la atenuación en dB causada por la propagación del enlace a lo largo de su trayectoria desde la antena transmisora hasta la antena receptora, y se calcula mediante la ecuación (2) del modelo de propagación en el espacio libre descrito en este trabajo. Este modelo en particular se conoce como modelo de *Crane*, y se utiliza principalmente en situaciones donde ambos transmisor y receptor tienen línea de vista clara, sin obstáculos, generalmente para enlaces terrestres con línea de vista, así como para enlaces satelitales tierra-espacio y espacio-espacio y, ahora, también para el caso de enlaces aéreos tierra-aire y aire-aire. Existen otras formas de calcular estas pérdidas por trayectoria como los modelos de *Rayleigh*, *Rice* o *Lognormal* por mencionar algunos, cada uno con diferentes parámetros y consideraciones. Estos otros modelos se usan principalmente en enlaces donde no hay línea de vista clara y se tienen obstáculos, interrupciones por bloqueo, y multitrayectorias, como en los casos de comunicaciones móviles y celulares, así como en redes inalámbricas domésticas, industriales y urbanas.

## 3.6 Parámetros de calidad del servicio

Para definir los parámetros de calidad de servicio se suele referenciar los Identificadores de Calidad de 5G o 5QI (*5G Identifiers Quality*), que son las identidades de los flujos QoS designados para cada servicio a nivel lógico de la red. Se debe enfatizar que estos parámetros aún no están completamente definidos y se sigue desarrollando estándares de calidad para las NTN, como muestra los 5QI de la más reciente actualización por la 3GPP en la Tabla D - 1 en Anexos, correspondiente a Mayo de 2024. Por lo tanto, y dada la ausencia de valores específicos para el uso de 5G sobre plataformas aéreas al momento de escribir este documento, se trabajará en esta tesis con los parámetros 5QI considerados para 5G sobre redes satelitales para medir su rendimiento.

### 3.6.1 Latencia

Siempre que se busque realizar una comunicación punto a punto, es importante estimar el tiempo de retardo en el arribo de la información a su destino deseado buscando reducir al mínimo este tiempo, llamado latencia. Para algunos servicios y aplicaciones 5G, por ejemplo, en el caso de uso uRLLC descrito anteriormente es crítico que la información llegue en un tiempo máximo, por lo que la red 5G debe ser capaz de transferir los datos en un rango de tiempo específico determinado por las especificaciones técnicas respectivas. La Tabla 9 muestra un conjunto de valores de latencias recomendadas para distintas tecnologías inalámbricas 5G NTN de acuerdo con el estándar TS 122 261 (ETSI, 2025a), los cuales solo se muestran para sistemas satelitales LEO, MEO y GEO, que recientemente fueron aumentados para incluir plataformas LAP y HAP (Sun & Giambene, 2024).

**Tabla 9** Retardos mínimos, máximos y de extremo a extremo para distintas plataformas. Extraído de (ETSI, 2025a; Sun & Giambene, 2024)

Plataforma	Retardo en enlace	Retardo de extremo a extremo
LAP	0.05-0.25 ms	5.5 ms
HAP	0.2-1.2 ms	7.4 ms
LEO	3-15 ms	35 ms
MEO	27-43 ms	95 ms
GEO	120-140 ms	285 ms

Dado que el estándar TS 122 261 abre una nota donde se aclara que se añaden 5 ms por retardo de red en cada plataforma, en este trabajo también se considera dicho valor para HAPs y LAPs, aunque esto queda a consideración de los futuros avances en materia de retardo por procesamiento a bordo. Para este trabajo se consideró los tiempos de retardo (latencias) de extremo a extremo por propagación, más la latencia de red, visto en esta misma Tabla 9.

### 3.6.2 Velocidad de bits

La velocidad de transmisión de información de bits o tasa de bits (*Bit rate,  $b_r$* ), es la velocidad a la que se transfieren los bits de un lugar a otro, ya sea de una computadora a otra, de un dispositivo móvil a la radio

base, o en el caso de enlaces aéreos, la velocidad a la cual viajan los bits entre la estación base terrena y la plataforma aérea. Este parámetro se mide en bits por segundo (bps, b/s) y es indispensable en la determinación de la calidad de servicio, ya que proporciona una cuantificación de la cantidad de información transmitida a través del tiempo. Conociendo la velocidad de bits se puede deducir si el canal de transmisión es veloz o lento para determinada aplicación o servicio, ya que no todas las aplicaciones requieren de la misma velocidad.

Por ejemplo, las aplicaciones para IoT no requieren de la misma velocidad de bits que una transmisión de video, realidad virtual, navegación web, o una sesión de chateo, lo que permite redistribuir los recursos en el diseño del sistema dependiendo de la demanda de servicios en cada caso. Se tomó de referencia el estándar actual TS 122 261, el cual especifica algunos Indicadores Clave de Rendimiento (*Key Performance Indicator*, KPI) para posibles escenarios de acceso satelital, los cuales se presentan de manera sintetizada en la Tabla 10.

**Tabla 10** KPI para distintos escenarios. Extraída de (ETSI, 2025a).

Escenario	Velocidad de bits experimentada		Movilidad	Tipo de dispositivo
	Bajada - Subida			
Peatón	1 Mbit/s – 100 kbit/s		Peatón	De mano
Seguridad Pública	3 – 5 Mbit/s		100 km/h	De mano
Conectividad vehicular	50 – 25 Mbit/s		>250 km/h	Montado en vehículo
Conectividad aérea	360 – 180 Mbit/s		>1000 km/h	Montado en aeronave
Estacionario	50 – 25 Mbit/s		Estacionario	Montado en edificio
Video vigilancia	0 o 5 – 3 Mbit/s		0 - >250 km/h	Fijo o en vehículo
IoT de banda estrecha	2 – 10 kbit/s		>100 km/h	IoT

Si bien la Tabla 10 esta sintetizada con los KPI de interés, hay otros más que determinan el rendimiento del sistema tal como la capacidad de tráfico por área o el factor de actividad y densidad de usuarios, que se definirá en futuras adiciones al estándar, por lo que no es necesario considerarlos por ahora. Cabe aclarar que el escenario “*peatón*” está basado en un área rural lo cual es un excelente indicador para este trabajo, mientras que el escenario de “*video vigilancia*” comparte valores con los protocolos MAVLINK (ampliamente utilizado para RPAS) y NG-RAN. Estos valores no son rigurosos y deben ser analizados independientemente, como lo marca el estándar.

### 3.6.3 Ancho de banda

La técnica utilizada en la tecnología 5G NR para definir el ancho de banda se le conoce como Portadora de Partes de Ancho de Banda (*Carrier Bandwidth Part, BWP*) y es introducido como un método para reducir el consumo de energía de los dispositivos, optimizando el uso de batería. Según su definición técnica, son bloques de recursos físicos contiguos seleccionados de un subconjunto contiguo de elementos de recursos, para una numerología dada una portadora. Una parte de ancho de banda es una porción designada extraída del ancho de banda general del operador y representa un subconjunto del espectro total disponible en la portadora. Dentro de este BWP, se forma una agrupación contigua de Bloques de Recursos Comunes (CRB). Este conjunto de CRB está situado dentro del ancho de banda de la portadora más grande y se extiende a lo largo de una secuencia de CRB adyacentes. Esto funciona activando un ancho de banda amplio en situaciones de ráfagas de tráfico (congestión) y un ancho de banda angosto cuando no hay congestión, que también se conoce como "*adaptación del ancho de banda*" (Lin et al., 2020), como se realizó en la Tabla 11.

**Tabla 11** Ancho de banda de acuerdo con la banda de frecuencia.

Banda de frecuencia	MHz
n254)	5, 10, 15
n255)	5, 10, 15, 20
n256)	
n510)	
n511)	50, 100, 200, 400
n512)	

Las bandas mostradas en la Tabla 11 están asignadas a NTN, por lo que se puede decir que son capaces de soportar dichos valores que dependen de la numerología, espaciados entre portadoras y frecuencia. En este trabajo no prevén cambios dinámicos y se asigna un ancho de banda de acuerdo con valores típicos según las bandas de frecuencias. Para simplificar los cálculos se decidió asignar 10 MHz de ancho de banda para enlaces de servicio tanto de subida como de bajada (simétrico), y exagerar el valor en el enlace IPL y *backhaul* hasta 1,000 MHz o cien veces lo de un usuario, con tal de asimilar un canal de alto rendimiento en este diseño.

### 3.6.4 Disponibilidad

Por lo general, se considera que la operación de una red sea sin interrupciones idealmente, sin embargo, pueden darse casos donde aparecen complicaciones que ocasionen una caída del servicio por fenómenos hidrometeorológicos, indicando su disponibilidad como un porcentaje relacionado con el tiempo que opera la red durante todo el año (Conte Galván, 2020). La preocupación más grande en las redes inalámbricas son las caídas del enlace por atenuación climática, o fallo catastrófico en uno de los elementos por razones naturales u ocasionadas por el hombre, por lo cual la característica que lo define es la misma resiliencia de la red. El principal atractivo de las redes aéreas es que, al estar bastante lejos del suelo, no son afectadas de la misma manera que las redes terrestres, brindando enlaces más resilientes y permitiendo mayor disponibilidad.

### 3.6.5 Calidad del canal

El principal objetivo del presupuesto de enlaces es encontrar su Relación Portadora a Ruido o CNR, la cual determina la calidad de la señal portadora recibida medida en dB, en relación con el nivel de ruido del receptor. Si la señal digital ha sido modulada para el enlace, entonces la calidad del enlace resultante se puede obtener a partir del CNR mediante su Tasa de Errores de Bit (*Bit Error Rate*, BER), que es un valor numérico real, comparado con la Probabilidad de Error de Bit (*Bit Error Probability*, Pb), que es un valor probabilístico. En enlaces satelitales se busca que el valor de CNR sea mayor que 7 dB como mínimo aceptable, pero pasados los 10 dB se considera una señal excelente, aunque esto puede cambiar con redes inalámbricas terrestres, aun así, existen otros indicadores de calidad como se realizó en la Tabla 12 (Vakada, 2025).

**Tabla 12** Comparación de indicadores de calidad de señal para redes terrestres.

	SNR/CNR	RSSI	RSRP	RSRQ
Excelente	$\geq 20$ dB	$\geq -30$ dBm	$\geq -80$ dBm	$\geq -10$ dB
Buena	13 – 20 dB	-30 – -55 dBm	-80 – -90 dBm	-10 – -15 dB
Mitad de cobertura	0 – 13 dB	-55 – -90 dBm	-90 – -100 dBm	-15 – -20 dB
Borde de cobertura	$\leq 0$ dB	$\leq -90$ dBm	$\leq -100$ dBm	$\leq -20$ dB

La Tabla 12 compara distintos indicadores que aportan diferente información de la calidad del canal. En redes de telecomunicaciones existen indicadores para distintas relaciones entre parámetros, en los cuales se tiene el Indicador de Intensidad de la Señal Recibida o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) que define la potencia recibida en el receptor, la Señal de Referencia de Potencia Recibida o RSRP (*Reference Signal Received Power*) la cual es la potencia promedio de los elementos de recursos portadores, misma de la señal de referencia específica a la celda sobre un BWP, y por último la Señal de Referencia de Calidad Recibida o RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) que indica la calidad de la señal en relación con el número de bloque de recursos. Estos parámetros también son importantes y se obtienen de herramientas de medición o dispositivos como los enrutadores cuentan con esta capacidad, aunque no son utilizados en la teoría generalmente, se consideró importante mencionarlos ya que funcionan como métricas que puedan ser analizadas después en la práctica (Lin et al., 2020).

## Capítulo 4. Casos de estudio y análisis de cobertura, latencia y enlaces del sistema

---

De acuerdo con los objetivos planteados inicialmente, se diseñó y analizó un sistema de enlaces de radiocomunicación sobre HAPS con características adecuadas para aplicaciones del ecosistema 5G. Las redes presentadas se denominan NTN, por lo cual es importante examinar cobertura, latencia y desempeño del canal en relación con el ruido térmico, asimismo los despliegues fueron analizados bajo condiciones de lluvia de regiones mexicanas.

Las regiones pluviales determinan la disponibilidad de la red mediante tasas de lluvia asignadas por región del territorio nacional, además los fenómenos implicados en atenuaciones por trayectoria, junto con el índice pluvial, crean un contexto para predecir el comportamiento del canal. A partir de estas suposiciones, se crearon casos de estudio en diferentes escenarios. Finalmente, se propone posibles constelaciones de HAPS (distribuida heurísticamente) basada en las observaciones, resultados y estado del arte descrito en este trabajo.

### 4.1 Despliegues de red 5G sobre HAPS

En esta sección, se definen las fronteras de los despliegues diseñados según lo descrito en el Capítulo 3. El diseño de despliegues debe abarcar una variedad de parámetros según el servicio o aplicación, por lo que se optó por comenzar con el tipo de arquitectura, después el número de nodos para nuestra red, pasando por el tipo de carga útil a bordo de las plataformas y finalmente los demás aspectos que se describen a continuación.

Se exploró dos arquitecturas: la primera, HAPS en su formato de repetidor sin nodos intermedios con el usuario, y la segunda es una arquitectura de múltiples saltos con un nodo terrestre repetidor que se encuentra en medio conectándose con el usuario. Otro elemento importante en la red es el gNB, que se encontrará junto con el GW para que la red se considere 5G, aunque no jugará un papel en este análisis.

Es crucial observar los cambios al añadir otra plataforma a las arquitecturas mencionadas para conocer cómo se comportaría la calidad del canal con dos plataformas en la red. Partiendo de los cuatro casos de estudio, dos por cada arquitectura, donde se consideró que fueran libre de celdas y se radiaría mediante

un haz dinámico espacialmente filtrado bajo un área de cobertura con FDD, cuando la plataforma esté dando servicio directo al usuario, y TDD para el enlace *backhaul*.

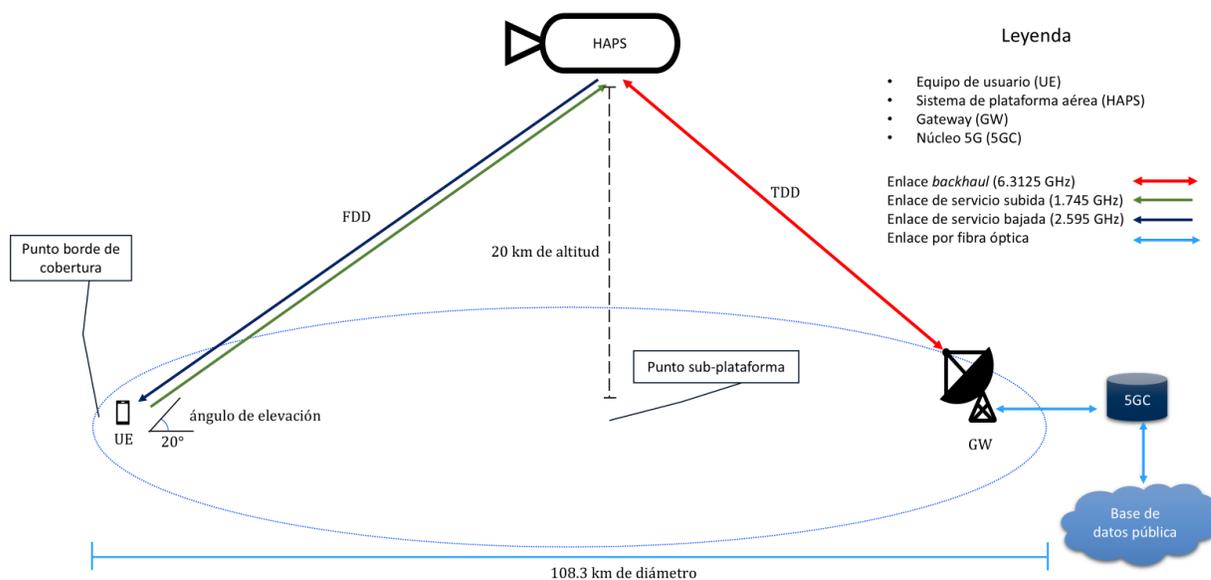
Lo último dicho también es válido cuando existe un nodo repetidor en tierra, el cual se enlazará usando una frecuencia distinta asignada al enlace *backhaul*, a esta arquitectura se le denomina "*múltiples saltos*". Este análisis no considera interferencias de ningún tipo para simplificar el enfoque de los despliegues. Añadiendo que, en todos los casos de estudio las plataformas cuentan con una carga útil transparente que solo amplifica y cambia la frecuencia de los enlaces, por lo tanto, la plataforma se considera como HBS según la terminología.

Otra cuestión importante es que todos los enlaces del despliegue son mediante RF, donde se analizará la calidad del canal en relación con el ruido térmico, además de considerar atenuaciones prácticas como las ocasionadas por fenómenos hidrometeorológicos. Sin embargo, pueden existir otras atenuaciones específicas fuera del enfoque de la tesis. Por otro lado, se consideró al usuario como fijo, aunque en la práctica tenga movilidad (la cual es despreciable) y siempre esté en línea de vista. Se hace énfasis en que los parámetros considerados, como la velocidad de bits, ancho de banda y potencia de transmisión, son valores típicos encontrados en la literatura.

#### 4.1.1 Caso de estudio 1 – Servicio directo a dispositivos

Este primer caso de estudio presenta el despliegue más sencillo, con una arquitectura compuesta por un solo HAPS. El sistema proporcionará servicio de comunicaciones directamente al UE utilizando las frecuencias de 1.745 GHz para el enlace de subida y 2.595 GHz para el de bajada (por FDD). El enlace *backhaul* se comunicará a través de la frecuencia de 6.3125 GHz con TDD. Estas frecuencias no se ven tan afectadas por fenómenos hidrometeorológicos, lo que asegura una mayor disponibilidad en la red.

Este caso estudia la posibilidad de conexión directa con dispositivos de mano y la capacidad del canal para soportar enlaces de alta velocidad de bits usando una sola plataforma. El usuario tendrá cobertura desde una altitud de 20 km, donde su posición se intercalará entre el punto sub-plataforma y el borde de cobertura. Al ser una cobertura sin teselación (libre de celdas), el GW también se encuentra bajo el área de recepción del HAPS suponiendo que está al borde de cobertura en el extremo contrario del UE, ya que no tendría sentido que el GW se posicionara junto al UE en el punto sub-plataforma, la Figura 26 ilustra el caso de estudio.



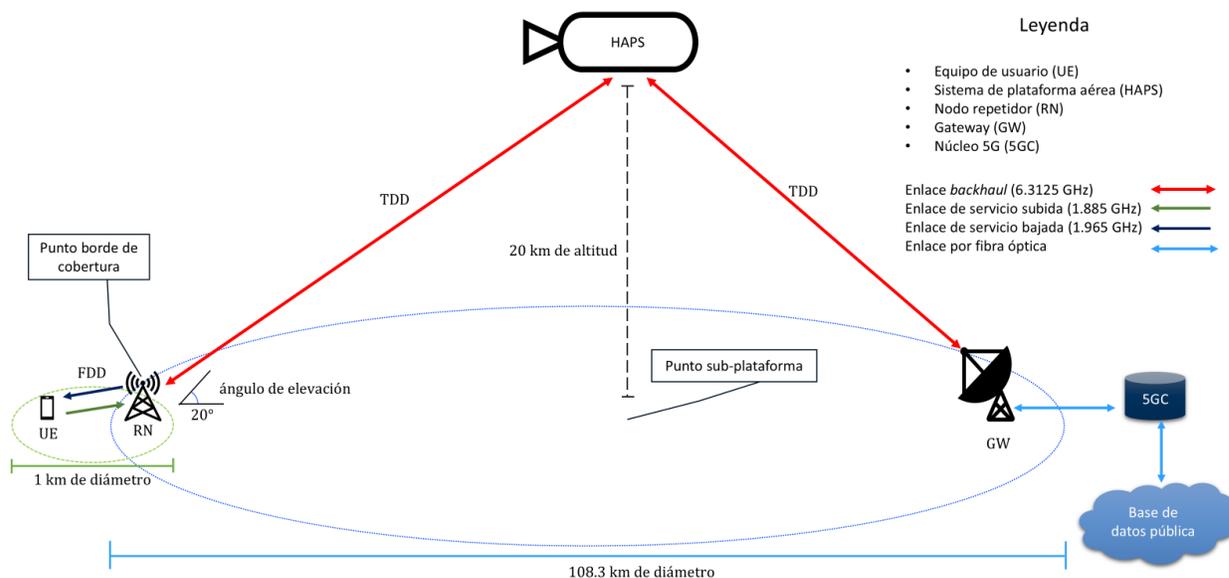
**Figura 26** Topología para el caso de servicio directo a dispositivos.

Las condiciones climáticas al ocasionar afectación a la calidad del canal, también lo hará con el servicio que se esté proveyendo. Mientras que las lluvias torrenciales de regiones de México, aunque no sean prolongadas, afectan a los servicios como el de comunicaciones de emergencia, el cual requiere de una disponibilidad ininterrumpida. Así que, el caso de estudio demostrará la confiabilidad del despliegue o red de una sola plataforma ante fenómenos hidrometeorológicos extremos.

#### 4.1.2 Caso de estudio 2 – Arquitectura de múltiples saltos

Para este segundo caso, se exploró la arquitectura de múltiples saltos. La red presenta un nodo intermedio que funciona como RN. Los RN pueden ser BS con tecnología 4G y no es necesario que sean de última generación. En este caso, se consideró que el RN tiene una antena dedicada a establecer un enlace *backhaul* con la plataforma. Las antenas del sistema de arreglos en fase son lineales de 8 elementos para enlaces de servicio y 16 elementos para enlaces *backhaul*.

Al igual que en el caso anterior, la posición del RN se intercalará entre el punto sub-plataforma y el borde de cobertura, al igual que el UE, pero dentro de la cobertura del RN. Ahora, las frecuencias asignadas para el enlace de servicio de RN a UE son 1.885 GHz de subida y 1.965 GHz de bajada, mientras que la frecuencia de 6.3125 GHz con TDD se usará para los enlaces *backhaul* del RN al HAPS y del HAPS al GW, la Figura 27 ilustra el caso de estudio.

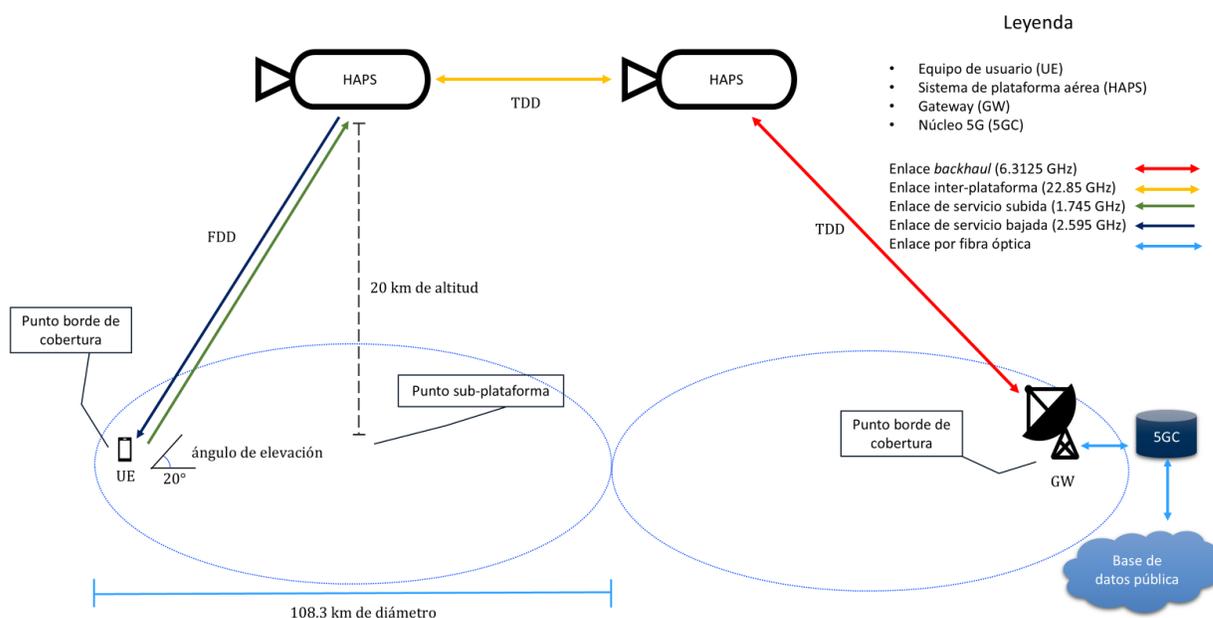


**Figura 27** Topología para el caso de múltiples saltos.

En un escenario de emergencia, es común desplegar bases móviles para la comunicación entre los administrativos que operan la logística del evento y los escuadrones de búsqueda y rescate. Si las estaciones móviles no cubren el área hasta el GW, los HAPS pueden apoyar en esta situación, ampliando la cobertura sin necesidad de desplegar más bases móviles en el terreno comprometido. Este despliegue se describe como una red integrada terrestre-aérea, con servicio de *backhaul* a la infraestructura terrestre de los operadores móviles.

#### 4.1.3 Caso de estudio 3 – Servicio directo a dispositivos con enlace inter-plataforma

A diferencia del primer caso de estudio, este explora el despliegue al agregar un HAPS más a la red. La transmisión de datos pasará por un enlace inter-plataforma, utilizando ondas milimétricas según el CNAF para enlaces entre satélites, ya que las condiciones de espacio libre de la estratósfera son adecuadas para la propagación de frecuencias en este rango. Asimismo, como existen menores atenuaciones por espacio libre y el ambiente no presenta obstrucciones ni pérdidas por lluvia en un caso ideal, se optó por una comunicación horizontal a una altitud de 20 km. Sin embargo, en la práctica el IPL presentaría atenuaciones por apuntamiento, para este caso no se consideró dicha atenuación. Las frecuencias asignadas para el enlace de servicio y *backhaul* son las mismas que en el caso uno, mientras que el enlace inter-plataforma es a 22.85 GHz con TDD, la Figura 28 ilustra el caso de estudio.

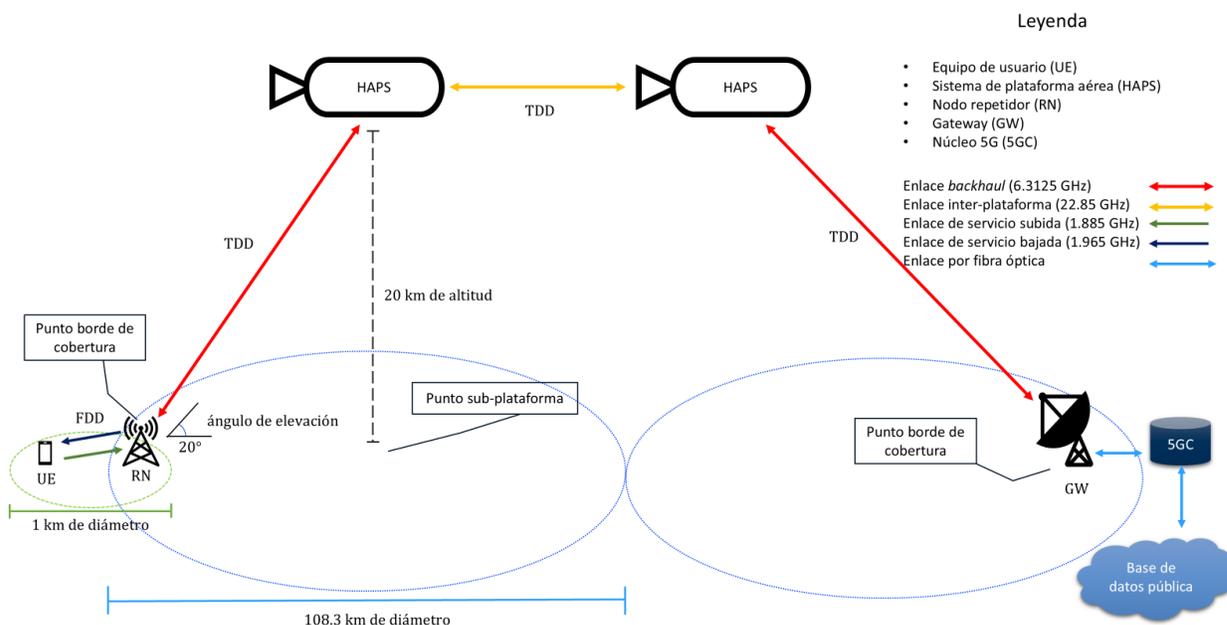


**Figura 28** Topología para el caso de servicio directo a dispositivos con enlace inter-plataforma.

Añadiendo un HAPS más a la fórmula, se extendería el área de cobertura, permitiendo comunicarse con un GW apartado de la zona principal a la que se brindaría servicio. Se consideró una antena igual a la del GW con 16 elementos para el enlace inter-plataforma, con el fin de mantener homogeneidad en la capa física de la red. El reto es mantener a los HAPS en una posición cuasi-estacionaria para el correcto funcionamiento del sistema y disminuir las mitigaciones en la calidad para los enlaces inter-plataforma, lo que recae en el área de control de la aeronave.

#### 4.1.4 Caso de estudio 4 – Arquitectura de múltiples saltos con enlace inter-plataforma

Para el cuarto y último caso, se diseñó un despliegue con enlace inter-plataforma y múltiples saltos, donde la red terrestre móvil actúa como repetidor. Las frecuencias utilizadas son: 1.885 GHz de subida y 1.965 GHz de bajada para el enlace de servicio entre el UE y el RN, 6.3125 GHz para el enlace *backhaul* entre el HAPS y el RN, 22.85 GHz para el enlace inter-plataforma entre HAPS y HAPS, y por último, 6.3125 GHz para el enlace entre HAPS y GW. Este despliegue es el más complejo y se puede escalar la topología de la red aumentando los RN y HAPS. Además, desde el punto de vista de ampliación de cobertura, es un caso aplicable a comunicaciones de emergencia, aunque sería necesario un análisis más profundo del comportamiento de la red, la Figura 29 ilustra el caso de estudio.



**Figura 29** Topología para el caso de múltiples saltos con enlace inter-plataforma.

Este caso de estudio pretende analizar las afectaciones de añadir un salto más a la red, sumando un total de cuatro. Durante su diseño, se observó que el enlace inter-plataforma puede presentarse un cuello de botella que afectaría a la redundancia de la red, pudiéndose mitigar añadiendo más plataformas al despliegue.

## 4.2 Herramienta de cálculo para presupuestos de enlaces HAPS

Para calcular los presupuestos de enlaces HAPS, se creó una plantilla en el programa Excel que incluye el cálculo de pérdidas, latencias, cobertura y presupuesto de enlace. La información de los resultados es accesible y permite a los interesados crear sus propios escenarios en la plantilla. Contiene varias hojas que clasifican las funciones y operaciones realizadas, con flexibilidad para modificarse según las necesidades del usuario. Además, incluye gráficas dinámicas y se organizó los resultados de manera amigable. Excel no cuenta con un marco de desarrollo gráfico, lo que dificulta crear una perspectiva física de la red. Por ello, se utilizó otra herramienta como complemento para graficar las posiciones y coberturas propuestas en un mapa, el complemento no es indispensable y cualquier herramienta con capacidades similares se puede usar. Sin embargo, con motivo de ilustrar el impacto en las regiones mexicanas, se muestran figuras que determinan el área de cobertura del despliegue HAPS en cuestión. A continuación, se muestran los pasos del desarrollo de este trabajo, junto con las fórmulas usadas en la planilla y los resultados obtenidos.

### 4.3 Cobertura

La recomendación F.1500-0 (Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2000) clasifica 3 zonas de cobertura, las cuales son la Zona de Cobertura Rural, Zona de Cobertura Suburbana y Zona de Cobertura Urbana. La Tabla 13 fue extraída de dicha recomendación. Sin embargo, la clasificación se considera muy optimista debido a las atenuaciones causadas por la propagación; a esto se debe añadir que existen BS capaces de proveer cobertura de hasta 30 km de radio, dado que los operadores móviles están interesados en aumentar el área para aumentar el retorno de inversión, esto es factible con plataformas aéreas (Arum et al., 2020).

**Tabla 13** Zonas de cobertura recomendadas por la UIT-R (2000).

Zona de Cobertura	Ángulos de elevación	Altitud de plataforma	
		Radio a 21 km	Radio a 25 km
Urbana	90° – 30°	0 – 36 km	0 – 43 km
Suburbana	30° – 15°	36 – 76.5 km	43 – 90.5 km
Rural	15° – 5°	76.5 – 203 km	90.5 – 234 km

Dicho esto, para determinar las dimensiones del área de cobertura se utilizó el modelo del artículo por Mingxiang et al. (2009), también se obtendrá el área de cobertura junto con la distancia máxima recorrida por el enlace dentro de la zona. De acuerdo con lo establecido en los casos de estudio, nuestra cobertura a diseñar debe tener características similares a la Tabla 13, lo que se consideraría una cobertura amplia.

#### 4.3.1 Modelo de cobertura

La altitud es el factor preliminar que determinará la cobertura de este diseño, a su vez está relacionada con el ángulo de elevación mínimo del usuario, además, se incluye la constante del radio de la Tierra, la relación se muestra en la ecuación (5):

$$d = 2R \left( \cos^{-1} \frac{R}{R+h} \cos \alpha \right) - \alpha \quad (5)$$

Donde  $d$  representa al diámetro de la cobertura,  $R$  siendo el radio de la Tierra (6,378 km),  $\alpha$  el ángulo de elevación mínimo y  $h$  la altitud del HAPS. Siguiendo el modelo, se realizaron cálculos a distintas altitudes,

además de obtener la distancia máxima (entre UE -HAPS) y área total de la misma cobertura. Cabe destacar que el rango de altitudes tomados para realizar los cálculos, son de acuerdo con el estado del arte de las plataformas aéreas. La distancia máxima se determinó con la ecuación (6):

$$dis_{max} = \frac{h}{\sin \alpha} \quad (6)$$

La distancia máxima recorrida por el enlace depende del ángulo de elevación y altitud, esto también es aplicable a satélites. El área total de la cobertura se obtiene como lo muestra la ecuación (7).

$$\text{Área}_{Tot} = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 \quad (7)$$

La obtención del área total provee información respecto la capacidad de terreno cubierto y como afectan los cambios de altitud, además de ser un valor importante cuando se toma en cuenta la distribución de población para un análisis de tráfico.

#### 4.3.2 Cálculo de cobertura

De acuerdo con la ecuación (5), se calculó la cobertura a altitudes de 17 km, 20 km, 22 km y 50 km en pasos de 5° del ángulo de elevación del usuario. Si bien la altitud de 50 km es exagerada, se debe señalar que según las características de los globos libres es posible llegar a dichas alturas.

Siguiendo la tendencia del estado del arte, se consideró realizar los cálculos para las plataformas de tipo globo libre que proveen de una cobertura muy amplia dada su altitud, las plataformas podrían servir como una capa extra entre las redes aéreas y espaciales en un futuro, por lo que es importante considerarlos como posibles habilitadores de la siguiente generación de redes móviles, en conjunto con los HAPS.

También, conforme a la ecuación (6) se obtuvo la distancia máxima que recorre el enlace dada la cobertura previamente calculada, además bajo la ecuación (7) se obtuvo el área superficial que cubriría dicha cobertura, los resultados se comparan en la Tabla 14.

**Tabla 14** Comparativa de resultados de altitudes con diferentes ángulos de elevación, se muestra diámetro de cobertura, distancia máxima de enlace y área total cubierta.

$h$	$\alpha$	$d$	$dis_{max}$	$\text{Área}_{Tot}$
17 km	5°	336.81 km	195.05 km	89,094.8 km <sup>2</sup>
	10°	184.73 km	97.9 km	26,802.28 km <sup>2</sup>
	15°	124.29 km	65.68 km	12,133.69 km <sup>2</sup>
	20°	92.25 km	49.7 km	6,683.82 km <sup>2</sup>
	25°	72.28 km	40.23 km	4,103.3 km <sup>2</sup>
	30°	58.5 km	34 km	2,687.92 km <sup>2</sup>
20 km	5°	388.29 km	229.47 km	118,413.57 km <sup>2</sup>
	10°	215.8 km	115.18 km	36,575.81 km <sup>2</sup>
	15°	145.71 km	77.27 km	16,675.7 km <sup>2</sup>
	20°	<b>108.29 km</b>	<b>58.48 km</b>	<b>9,210.81 km<sup>2</sup></b>
	25°	84.91 km	47.32 km	5,662.06 km <sup>2</sup>
	30°	68.74 km	40 km	3,711.69 km <sup>2</sup>
22 km	5°	421.63 km	252.42 km	139,622.18 km <sup>2</sup>
	10°	236.28 km	126.69 km	43,848.05 km <sup>2</sup>
	15°	159.91 km	85 km	20,083.41 km <sup>2</sup>
	20°	118.95 km	64.32 km	11,112.94 km <sup>2</sup>
	25°	93.3 km	52.06 km	6,837.25 km <sup>2</sup>
	30°	75.56 km	44 km	4,484.21 km <sup>2</sup>
50 km	5°	827.8 km	573.69 km	538,190.04 km <sup>2</sup>
	10°	505.95 km	287.94 km	201,051.57 km <sup>2</sup>
	15°	352.2 km	193.19 km	97,425.58 km <sup>2</sup>
	20°	265.06 km	146.19 km	55,181.05 km <sup>2</sup>
	25°	209.12 km	118.31 km	34,345.13 km <sup>2</sup>
	30°	169.9 km	100 km	22,672.12 km <sup>2</sup>

#### 4.4 Latencia

La latencia por propagación es el tiempo que tarda la información en llegar a su destino y dependen de la distancia que debe viajar la señal, si bien existen otras latencias por procesamiento y por cola las cuales se refieren a los retardos ocasionados por los algoritmos que procesan la información en la red y la espera en que esto suceda respectivamente, pero dependen de los protocolos de capas superiores, como la de transporte o red por mencionar algunas. Esto último no se contempla en los casos de estudio, ya que son consideradas en análisis de redes con una densidad de usuarios y tráfico dado, por lo que para este trabajo

son insignificantes debido al hipotético caso de que la optimización del sistema es la ideal (0 ms por procesamiento).

#### 4.4.1 Modelo de latencia por propagación

La latencia o retardo nos provee la distancia recorrida en el medio, en base a la velocidad de la luz, ya que las señales de radiofrecuencia viajan a esta velocidad naturalmente. El modelo utilizado se encuentra en la ecuación (8):

$$latencia = 1000 * \frac{dis}{c} \quad (8)$$

La *dis* (en metros) es medida desde el punto de transmisión hacia el de recepción y la velocidad de la luz *c* es una constante con valor de 299,792,458 m/s. El resultado de la división es proporcionado en segundos, por esto mismo para obtenerlo en milisegundos se multiplica por mil.

#### 4.4.2 Cálculo de latencia para los despliegues

En base al modelo de la ecuación (8), se obtuvo los retardos por propagación mostrados de la Tabla 15 hasta la Tabla 18, de acuerdo con los casos de estudio diseñados. Los resultados fueron obtenidos de ida y de regreso, es decir, el tiempo que tarda la información en ser enviada y recibida desde el UE.

**Tabla 15** Resultados de latencia para el caso de estudio 1.

Caso de estudio 1	Punto sub-plataforma	Punto a borde de cobertura
UE – HAPS	0.07 ms	0.20 ms
HAPS – GW	0.20* ms	0.20 ms
GW – HAPS	0.20* ms	0.20 ms
HAPS – UE	0.07 ms	0.20 ms
Sumatoria de recorrido	0.52 ms	0.78 ms

**Tabla 16** Resultados de latencia para el caso de estudio 2.

Caso de estudio 2	Punto sub-plataforma	Punto a borde de cobertura
UE – RN	0.0001 ms	0.003 ms
RN – HAPS	0.07 ms	0.20 ms
HAPS – GW	0.20* ms	0.20 ms
GW - HAPS	0.20* ms	0.20 ms
HAPS – RN	0.07 ms	0.20 ms
RN – UE	0.0001 ms	0.003 ms
Sumatoria de recorrido	0.52 ms	0.79 ms

**Tabla 17** Resultados de latencia para el caso de estudio 3.

Caso de estudio 3	Punto sub-plataforma	Punto a borde de cobertura
UE – HAPS	0.07 ms	0.20 ms
HAPS – HAPS	0.07 ms	0.20 ms
HAPS – GW	0.18 ms	0.36 ms
GW - HAPS	0.07 ms	0.20 ms
HAPS – HAPS	0.18 ms	0.36 ms
HAPS – UE	0.07 ms	0.20 ms
Sumatoria de recorrido	0.63 ms	1.5 ms

**Tabla 18** Resultados de latencia para el caso de estudio 4.

Caso de estudio 4	Punto sub-plataforma	Punto a borde de cobertura
UE – RN	0.0001 ms	0.003 ms
RN – HAPS	0.07 ms	0.2 ms
HAPS - HAPS	0.18 ms	0.36 ms
HAPS – GW	0.07 ms	0.20 ms
GW - HAPS	0.07 ms	0.20 ms
HAPS - HAPS	0.18 ms	0.36 ms
HAPS – RN	0.07 ms	0.20 ms
RN – UE	0.0001 ms	0.003 ms
Sumatoria de recorrido	0.63 ms	1.51 ms

Se debe mencionar que se considera el GW en la Tabla 15 y Tabla 16 en la posición a borde de la cobertura, por lo que el retardo es de 0.2 ms en ambos casos. Como se había visto en el Capítulo 3. , la especificación técnica (ETSI, 2025a) considera 5 ms de retardo por redes satelitales, esto fácilmente podría añadirse como parte de este análisis, sin embargo, se consideró que este es un área específica que se debe estudiar por su parte. Idealmente se consideró a los retardos por propagación como los únicos en los cálculos y resultados. Para todos los casos es deseable que los parámetros de latencia se encuentren cercanos a los vistos Tabla D - 1 de Anexos.

## 4.5 Factores para presupuesto de enlaces

Antes de obtener el CNR Total por cada caso de estudio bajo diferentes escenarios, se debe calcular el de cada enlace individualmente, además de realizarlos bajo cuatro esquemas de modulación y para todas las tasas pluviales. Los enlaces de servicio y *backhaul* son simétricos, por lo que se considera el mismo ancho de banda y velocidad de bits para enlaces de subida como de bajada idealmente. Las modulaciones son las usadas por la tecnología 5G (sin contar 1024QAM), para este trabajo se despreció la corrección de errores, debido a que se consideró la eficiencia espectral de cada modulación bajo el ancho de banda 10 y 1,000 MHz, que naturalmente hace redundante la información si se cuenta con el restante del ancho de banda.

### 4.5.1 Modulación y ancho de banda

La Modulación de Amplitud en Cuadratura o mejor conocida como QAM por sus siglas en inglés (*Quadrature Amplitud Modulation*), es aquella técnica que combina dos señales en una portadora a diferentes frecuencias y fases. Dependiendo de los niveles de amplitud y fase soportadas es el número asignado a la técnica, por ejemplo, 16QAM utiliza 16 niveles lo que le permite transmitir 4 bits por símbolo. La explicación teórica del funcionamiento de la técnica esta fuera del enfoque de este trabajo, pero es importante entender que, a mayor nivel de amplitudes y fase, mayor será la eficiencia espectral lo que habilita transmitir mayor cantidad de datos. A continuación, se presenta la Tabla 19 que se realizó para mostrar la eficiencia espectral de las cuatro modulaciones utilizadas en este trabajo.

**Tabla 19** Eficiencia espectral de modulaciones utilizadas.

Modulación	$\mu$
QPSK	2 bits/Hz
16QAM	4 bits/Hz
64QAM	6 bits/Hz
256QAM	8 bits/Hz

Bajo estos datos, se puede obtener el ancho de banda de ruido  $B_N$ , el cual es la relación entre la eficiencia espectral  $\mu$  de las modulaciones con la velocidad de bits  $b_r$  haciendo la suposición que es garantizada y estable. El  $B_N$  es un parámetro fundamental para toda aplicación, especialmente de eMBB que dependen de un gran ancho de banda para un funcionamiento óptimo. Para obtener  $B_N$  se realiza con la ecuación (9):

$$B_N = \frac{b_r}{\mu} \quad (9)$$

La  $B_N$  es aquella apertura del espectro radioeléctrico del enlace de comunicación que contiene la información que se ve afectada por el ruido en general, ahora los resultados obtenidos bajo la ecuación (9) para cada esquema y tipo de enlace se observan en la Tabla 20.

**Tabla 20** Resultados de ancho de banda de ruido de acuerdo con la modulación y velocidad de bits.

Modulación	$b_r$	$B_N$
QPSK	10 Mbits/s	5 MHz
16QAM	10 Mbits/s	2.5 MHz
64QAM	10 Mbits/s	1.67 MHz
256QAM	10 Mbits/s	1.25 MHz
QPSK	1,000 Mbits/s	500 MHz
16QAM	1,000 Mbits/s	250 MHz
64QAM	1,000 Mbits/s	167 MHz
256QAM	1,000 Mbits/s	125 MHz

#### 4.5.2 Elementos y sus parámetros

Se debe tener en cuenta que la potencia de transmisión está regulada por estándares (ETSI, 2025c) este valor no puede ser superado en el caso de los enlaces de servicio a usuarios para no diezmar a las transmisiones externas al despliegue (si es que hay). Por otro lado, para la temperatura del sistema se utiliza el valor típico de 300 grados kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ) para todos los sistemas idealmente. Asimismo, las pérdidas por implementación están consideradas arbitrariamente de acuerdo con casos de estudio previos (Hemadeh et al., 2018; Patra & Mitra, 2020), sin embargo, para el caso de los HAPS no se encontró información de valores típicos, la Tabla 21 se realizó con dichos parámetros.

**Tabla 21** Parámetros iniciales para cada elemento del despliegue.

Parámetros	HAPS	HAPS (IPL)	BS	GW	UE	Unidades
Tipo de Antena	Arreglo Lineal de 8	Arreglo Lineal de 16	Arreglo Lineal de 8	Arreglo Lineal de 16	Isotrópica	N/A
Potencia de Tx $P_{Tx}$	30	40	30	40	20	dBm
Temperatura del Sistema $T_{Sis}$	300	300	300	300	300	K
Pérdidas por Implementación $L_v$	0	0	2	4	2	dB

#### 4.5.3 Ganancia y PIRE

De acuerdo con los parámetros iniciales se puede calcular la ganancia de las antenas bajo la ecuación (10) que es aplicable de manera general para arreglos de antenas lineales simples, si la antena transmisora es diferente a la que se asignó en este trabajo, la fórmula cambiaría.

$$G_{antena} = 10 * \log_{10}(\text{Número de elementos}^2) \quad (10)$$

Esta fórmula no aplica para la antena de UE, ya que se considera isotrópica y se toma un valor típico para dispositivos inteligentes o de mano. El PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) es aquella potencia efectiva radiada por el lóbulo principal de la antena transmisora relativa a un radiador isotrópico que tiene 0 dB de ganancia, y se obtiene con la ecuación (11):

$$PIRE = P_{Tx} + G_{antena} - L_v \quad (11)$$

Continuando, los resultados obtenidos para cada elemento del despliegue se muestran la Tabla 22.

**Tabla 22** Ganancias y PIRE de los elementos del despliegue.

Parámetros	HAPS	HAPS (IPL)	RN	GW	UE	Unidades
Ganancia $G_{antena}$	18.06	24.08	18.06	42.14	3	dBi
PIRE	48.06	64.08	46.06	78.14	21	dB

Nótese que el PIRE para antenas de HAPS dedicadas al enlace *backhaul* es mayor que la de servicio, esto mismo es para garantizar una buena calidad del canal. Por último, se consideró hipotéticamente que no hay saturación de símbolos y tampoco el gasto de energía de las plataformas.

#### 4.5.4 Presupuesto de enlace

El presupuesto de enlace es el cálculo que determina si los enlaces de comunicación funcionarán dadas las condiciones adversas impuestas, y se obtiene con un balance entre las ganancias y pérdidas del sistema. Las ganancias que se consideró en la ecuación son la potencia de transmisión, así como las ganancias de las antenas de recepción y transmisión, mientras que las pérdidas son aquellas ocasionas por atenuaciones naturales como pérdidas por propagación, lluvia, gases atmosféricos e implementación, así como las ocasionas por el ruido térmico que está relacionado estrechamente con el ancho de banda asignada al sistema. Esto se calcula con la ecuación (12):

$$CNR = P_{Tx} + G_{Tx} - L_p - L_g - L_r - L_v + G_{Rx} - K - T_{Sis} - B_N \quad (12)$$

Donde  $L_p$  son las pérdidas por propagación (que son dependientes de la distancia recorrida),  $L_g$  son pérdidas por atenuación de gases,  $L_r$  son pérdidas por lluvia,  $L_v$  son pérdidas varias (implementación),  $G_{Tx}$  es la ganancia de antena de transmisión,  $G_{Rx}$  es la ganancia de antena de recepción,  $K$  la constante de Boltzmann (-228.6 dB/k),  $B_N$  la banda ancha de ruido y  $CNR$  la relación portadora-a ruido que determina la calidad del canal. Todos los valores están en decibeles, si los valores fueran numéricos la formula cambiaría como lo asigna la ecuación (13).

$$CNR = \frac{P_{Tx} G_{Tx} G_{Rx}}{L_p L_g L_r L_v K T_{Sis} B_N} \quad (13)$$

Cuando se habla de buena calidad del canal es en referencia a un valor mayor a 7 dB, siendo el mínimo para que exista la comunicación. Si es menor a este valor se considera como calidad de canal pobre o deficiente para mantener una comunicación de RF en el sistema. Por otro lado, para que el canal mantenga una velocidad alta de bits (entre 5-10 Mbits/s) necesitará sobrepasar los 10 dB de este rango de calidad.

Los factores que afectan principalmente a la calidad del canal son la  $P_{Tx}$ ,  $G_{Tx}$ ,  $G_{Rx}$  y  $L_p$ , dichos parámetros se pueden manipular con *hardware* y deberán ser previstos en el diseño del despliegue de acuerdo con los estándares internacionales. Ahora, el CNR obtenido es por cada enlace individual, para calcular la calidad del canal en todo el despliegue, se tiene que obtener en valor numérico el CNR en dirección ascendente, descendente y viceversa, con ambos valores se relacionan con la ecuación (13) y así obtener el  $CNR_{Total}$  con la ecuación (14):

$$CNR_{Total} = 10 * \log_{10} \left( \frac{1}{\frac{1}{CNR_{asc}} + \frac{1}{CNR_{desc}}} \right) \quad (14)$$

#### 4.5.5 Escenarios

Para analizar el despliegue en diferentes casos de estudio se plantearon 16 escenarios, donde se intercalan la posición en la que se encuentran las plataformas y UE (borde de cobertura o punto sub-plataforma), la tasa de lluvia (0 y 95 mm/hr) y las modulaciones (QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM). A continuación, en la Tabla 23 se exponen la configuración de los escenarios.

Para determinar cuáles tasas de lluvia presentadas en cada escenario se realizó el cálculo por frecuencia y se obtuvo el presupuesto de enlace independiente, en la Figura E - 1 presenta las pérdidas consideradas para los enlaces, mientras que en la Figura F - 1 en Anexos se presenta el presupuesto de enlace independiente. A los escenarios de la Tabla 23 se les aplicó la ecuación (13), como resultado se obtuvo un total de 64 resultados que se observan en la Tabla 24.

**Tabla 23** Configuración de escenarios expuestos en cada caso de estudio.

Escenario	Tasa de Lluvia	Posición	Modulación	Tipo
1	0 mm/hr (nulo)	Sub-plataforma	QPSK	D2D - Interoperable
2	0 mm/hr	Sub-plataforma	16QAM	D2D - Interoperable
3	0 mm/hr	Sub-plataforma	64QAM	D2D - Interoperable
4	0 mm/hr	Sub-plataforma	256QAM	D2D - Interoperable
5	0 mm/hr	Borde de cobertura	QPSK	D2D - Interoperable
6	0 mm/hr	Borde de cobertura	16QAM	D2D - Interoperable
7	0 mm/hr	Borde de cobertura	64QAM	D2D - Interoperable
8	0 mm/hr	Borde de cobertura	256QAM	D2D - Interoperable
9	95 mm/hr	Sub-plataforma	QPSK	D2D - Interoperable
10	95 mm/hr	Sub-plataforma	16QAM	D2D - Interoperable
11	95 mm/hr	Sub-plataforma	64QAM	D2D - Interoperable
12	95 mm/hr	Sub-plataforma	256QAM	D2D - Interoperable
13	95 mm/hr	Borde de cobertura	QPSK	D2D - Interoperable
14	95 mm/hr	Borde de cobertura	16QAM	D2D - Interoperable
15	95 mm/hr	Borde de cobertura	64QAM	D2D - Interoperable
16	95 mm/hr	Borde de cobertura	256QAM	D2D - Interoperable

**Tabla 24** Resultados de CNR Total en los escenarios para cada caso.

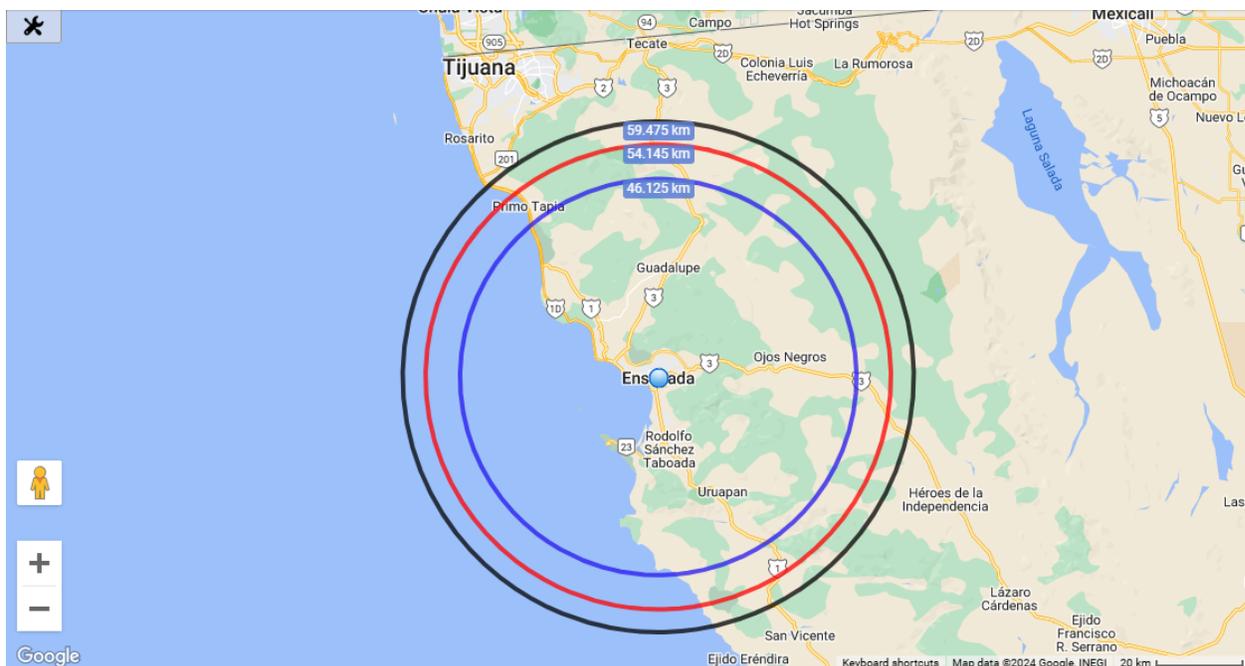
Escenarios	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
1	49.50 dB	42.70 dB	29.50 dB	29.34 dB
2	52.51 dB	45.71 dB	32.51 dB	32.35 dB
3	54.27 dB	47.47 dB	34.27 dB	33.86 dB
4	55.52 dB	48.72 dB	35.52 dB	35.36 dB
5	36.35 dB	26.99 dB	9.23 dB	9.16 dB
6	39.36 dB	30.00 dB	12.24 dB	12.18 dB
7	41.12 dB	31.76 dB	14.00 dB	13.94 dB
8	42.37 dB	33.01 dB	15.25 dB	15.19 dB
9	10.21 dB	10.14 dB	29.49 dB	25.67 dB
10	13.22 dB	13.15 dB	32.50 dB	28.68 dB
11	14.98 dB	14.91 dB	34.26 dB	30.45 dB
12	16.23 dB	16.16 dB	35.51 dB	31.69 dB
13	10.20 dB	-17.03 dB	6.68 dB	-17.04 dB
14	13.21 dB	-14.02 dB	9.69 dB	-14.03 dB
15	14.97 dB	-11.82 dB	11.45 dB	-12.27 dB
16	16.22 dB	-11.01 dB	12.70 dB	-11.02 dB
Promedio	30.015 dB	19.178 dB	22.176 dB	15.220 dB

## 4.6 Análisis de resultados

Esta sección muestra el análisis hecho para cada parte considerada en el diseño de los radioenlaces. El cálculo de cobertura fue el primer paso hecho que determinó las distancias recorridas por cada enlace, mientras que las latencias por propagación demuestran los beneficios de la integración de las redes aéreas como punto intermedio entre el espacio–tierra. Ahora el presupuesto de enlaces determina la posibilidad de establecer una cobertura amplia a cierta altitud para comunicaciones aplicadas a servicios de alta o baja velocidad con parámetros asignados bajo el enfoque de estándares por la 3GPP.

### 4.6.1 Análisis de cobertura

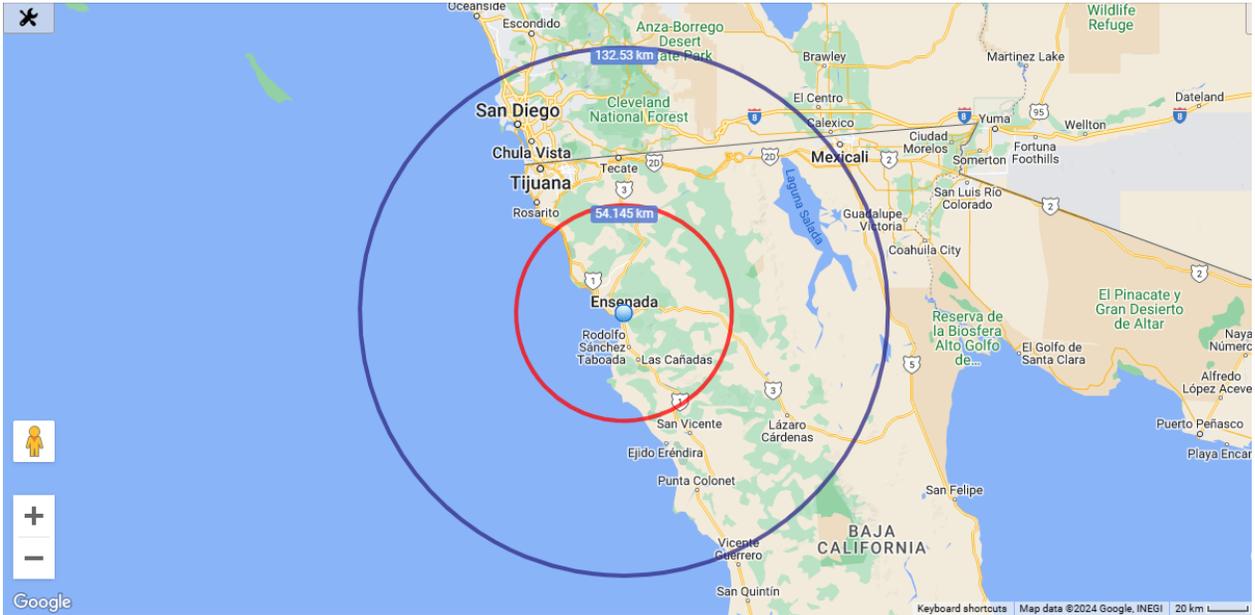
Haciendo referencia a los resultados descritos en la Tabla 14, es importante destacar el aumento del diámetro de cobertura en relación con la altitud. A 20° de elevación en las distintas altitudes se puede observar un rango entre 92.25 – 265.06 km de cobertura, el incremento no es lineal ya que la geometría de la Tierra es una esfera.



**Figura 30** Imagen comparativa de cobertura a 20° en 17 km (azul), 20 km (rojo) y 22 km (negro) de altitud.

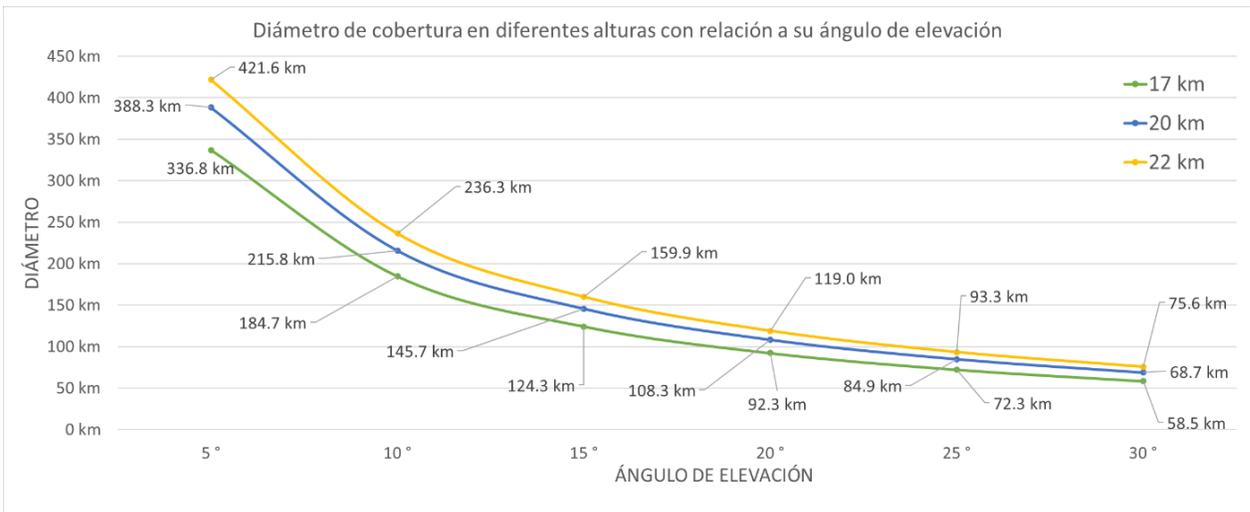
Además, se puede destacar que las altitudes de mayor interés (Figura 30) aumenta considerablemente el área de cobertura sobre el punto geográfico de referencia, en este ejemplo es la ciudad de Ensenada, Baja

California (punto sub-plataforma) donde la cobertura casi alcanza al poblado de Rosarito con una altitud de 22 km. Esta comparación demuestra que 1 km de diferencia entre altitudes aumenta de 2 – 3 km el radio de cobertura. Por otra parte, la Figura 31 muestran una comparación entre altitudes de 20 y 50 km, lo que representaría el impacto de los diferentes tipos de plataforma.



**Figura 31** Imagen comparativa de cobertura a 20° en 20 km (rojo) y 50 km (azul) de altitud.

Se hace énfasis que la altitud de 50 km podría ser utilizada por las plataformas de tipo globo libre, aun así, es muy optimista y es necesario mejorar los métodos de control y enrutamiento para establecer una buena recepción por los usuario y plataformas.

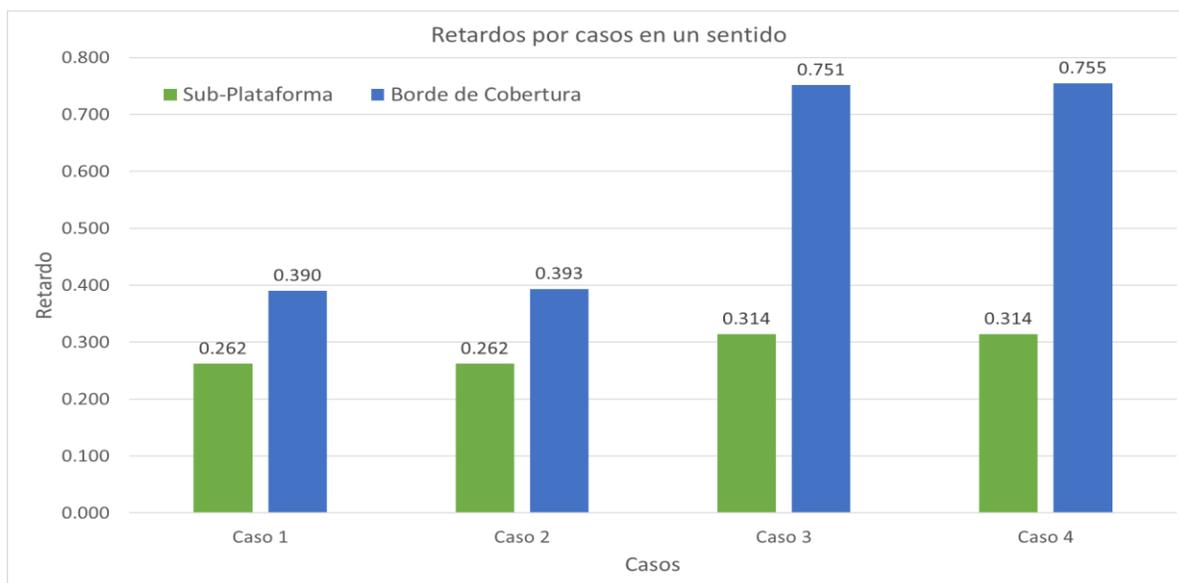


**Figura 32** Gráfica de resultados de cálculos de cobertura.

En la Figura 32 se comparan los resultados de la Tabla 14, donde se puede observar una tendencia descendente cuando aumenta el ángulo de elevación mínimo. Esto tiene sentido ya que se reduce el área bajo el HAPS. Ahora, las tres altitudes de interés (17, 20 y 22 km) se demuestra una notable diferencia en el aumento del área conforme se eleva la plataforma. Es posible que la plataforma no siempre se encuentre a una sola altitud (a menos de que el control de la aeronave sea estricto), así que un área dinámica de cobertura impactará en el presupuesto del enlace y la latencia.

#### 4.6.2 Análisis de retardo

En el análisis de retardo o latencia, a una altitud de 20 km con 20° de elevación mínima (que se considera como la óptima para zonas sub-urbanas y rurales), el retardo es considerablemente menor que 1 ms bajo las peores condiciones. Se puede decir que esta altitud y cobertura podrían ser habilitadoras de servicios que requieran ultra baja latencia. Para los servicios de eMBB es requerida una banda ancha capaz de transmitir grandes cantidades de datos, estos servicios son amplios e inherentemente requieren de una cobertura amplia y una latencia moderada, por lo que se puede decir que los radioenlaces diseñados en estos casos de estudio son capaces de soportar aplicaciones que recaen en estos casos de uso idealmente. La comparación entre casos de estudio se muestra en la Figura 33.



**Figura 33** Resultados de latencia en un sentido para los casos de estudio.

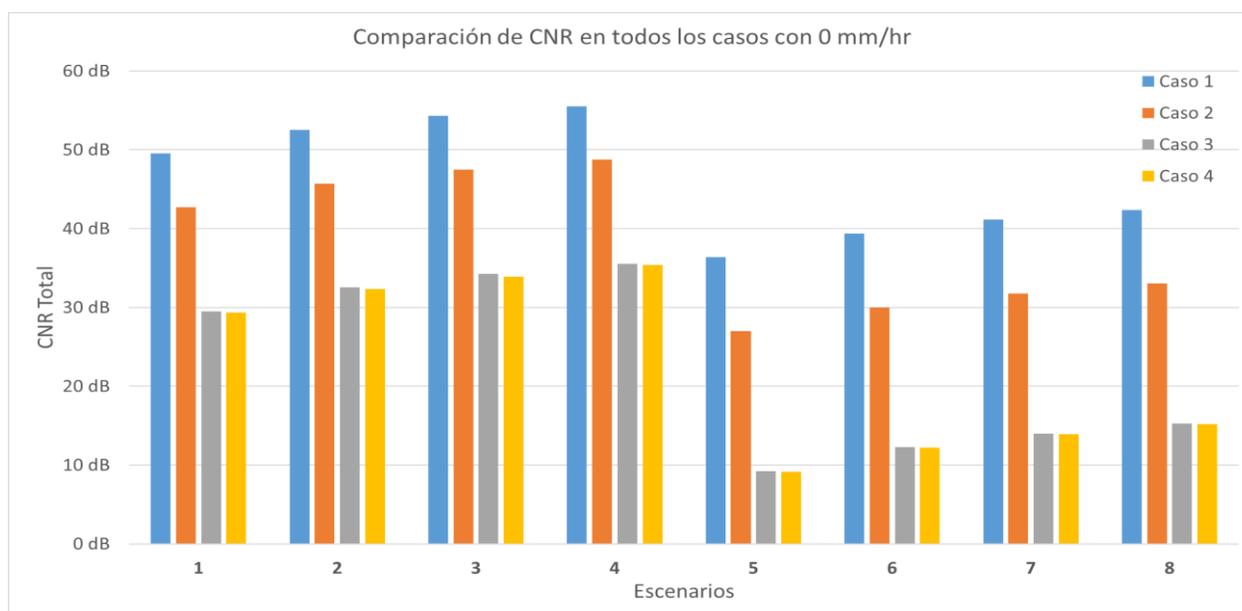
La gráfica de la Figura 33 se observa que, en los casos 1 y 2 hay una diferencia entre los valores de latencia que es notable entre las posiciones en las que se encuentran el UE y RN. Si bien no hay mucha diferencia

entre estos dos casos, cuando el UE/RN se posiciona a borde de cobertura aumenta considerablemente la latencia por propagación alrededor de 0.13 ms.

Por otro lado, los casos 3 y 4 si hay gran diferencia entre ellos de más del doble. Esto hace referencia a que, añadir un enlace inter-plataforma aumenta la latencia por propagación, siendo un comportamiento esperado ya que el enlace de comunicación está recorriendo mayor distancia. Sin embargo, cuando se compara los cuatro casos con el UE/RN en posición sub-plataforma, se observa un aumento de 0.052 ms, este aumento para aplicaciones críticas es considerable y no despreciable. Al comparar los cuatro casos con el UE/RN en posición a borde de cobertura, existe un aumento de 0.36 ms siendo casi el doble; se debe recordar que los casos 1 y 2 el GW está al borde de cobertura siempre, lo que confirma que el aumento visto en los valores de la gráfica se debe por añadir el enlace inter-plataforma.

#### 4.6.3 Análisis de CNR

Una vez visto la capacidad de cobertura de las plataformas y de la influencia en el retardo de los enlaces y trayectoria, se realiza a continuación el análisis de presupuesto de enlaces. Los resultados obtenidos no tienen una tendencia marcada, esto se comprueba observando que en casos específicos no se cumplió el mínimo de 7 dB para un enlace de buena calidad.

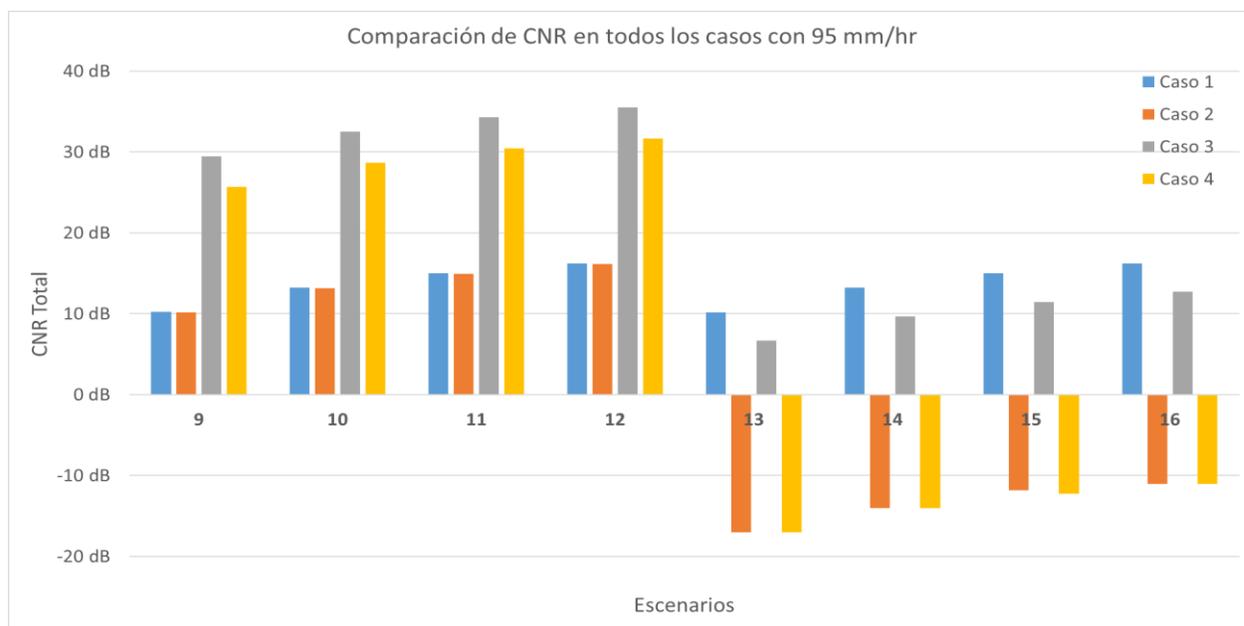


**Figura 34** Comparación de todos los casos en escenarios del 1 al 8.

Sin embargo, la mayoría superó los 10 dB de recepción lo que supondría una calidad excelente del canal y por ende, una velocidad rápida de bits. Para que sea más fácil de entender los resultados, se separaron los escenarios en dos partes, la primera parte (Figura 34) consta de los primeros ocho escenarios que representan enlaces con cielo despejado (0 mm/hr) y la segunda parte (Figura 35) representa los escenarios con lluvias extremas (95 mm/hr), esto para los cuatro casos de estudio diseñados. Esto es de acuerdo con la configuración de cada escenario que describe la Tabla 23.

En la Figura 34 los casos 1 y 2 demuestran un mejor desempeño en comparación con los casos 3 y 4, mientras que en los escenarios del 1 al 4, los casos 1 y 2 tienen una diferencia de casi 13 dB, y en los escenarios del 5 al 8 es superior a los 15 dB. Lo que significa que los enlaces terrestres impactan significativamente al desempeño total del despliegue.

Los casos 3 y 4 no variaron mucho entre sí en todos los escenarios, siendo el caso 3 superior por alrededor de 0.2 dB en todos los escenarios. Estos mismos se vieron impactados por 20 dB menos cuando el UE/RN se encontraba a borde de cobertura, mientras que los casos 1 y 2 es menos de 16 dB. Ahora, es importante recalcar que los escenarios para todos los casos aumentan en su desempeño cuando se cambia la configuración en modulación, esto es debido a que aumenta la eficiencia espectral.



**Figura 35** Comparación de todos los casos en escenarios del 9 al 16.

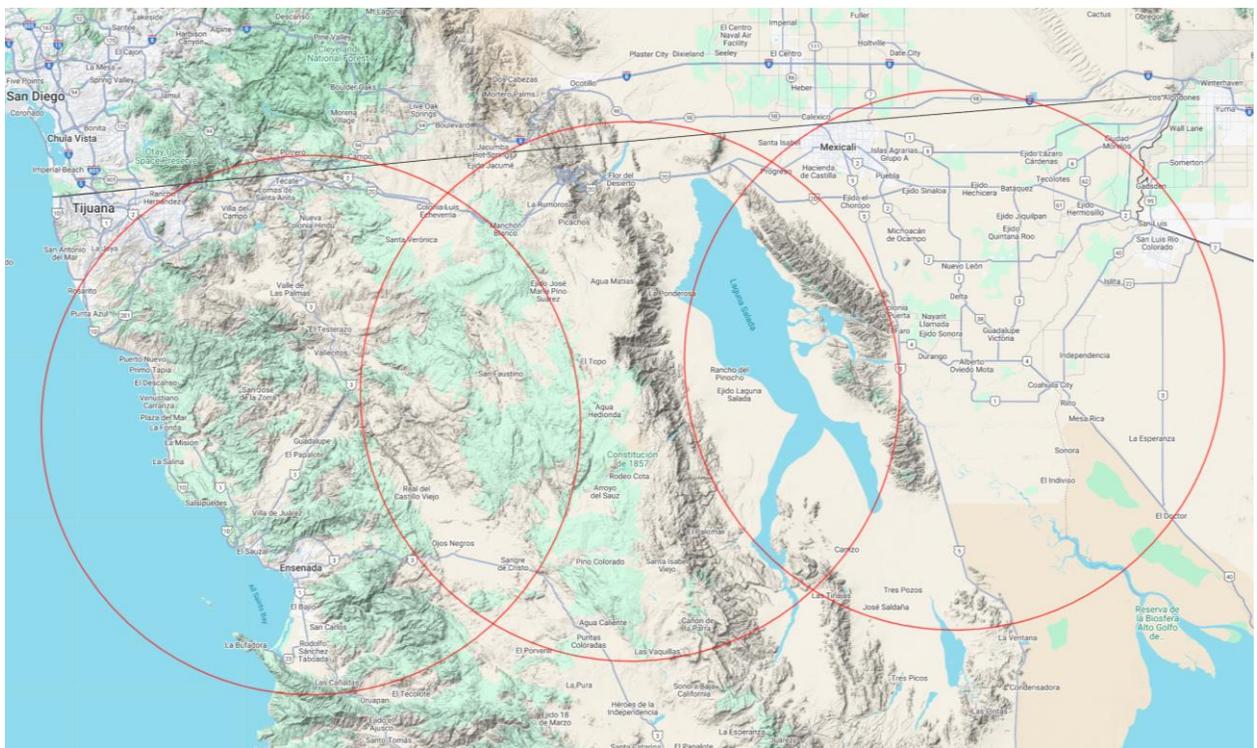
La Figura 35 muestra una dispersión no coherente en el desempeño para todos los escenarios en comparación a la Figura 34. Para los casos 1 y 2 se puede observar que no hay diferencia significativa para

los escenarios del 9 al 12, su diferencia es de alrededor de 0.1 dB, siguiendo a los escenarios del 13 al 16 se puede ver un patrón distinto a los anteriores, los casos 1 y 3 son los que mejor desempeño obtuvieron mientras que el enlace se perdió para los casos 2 y 4.

Esto reafirma lo anterior, donde se observa que los enlaces terrestres impactan negativamente el desempeño. Para el caso 3 en el escenario 13, no llega al mínimo de 7 dB quedando por debajo con 0.32 dB; mientras que el caso 1 siempre se mantuvo encima de los 10 dB, lo que reflejaría que los enlaces directo a dispositivos son mejor que uno con múltiples saltos aún con lluvias extremas y con enlaces inter-plataforma.

#### 4.7 Propuesta de red sobre HAPS

En base a estos resultados se propone una red sobre HAPS distribuida heurísticamente que cubra la región norte del estado de Baja California, esto es debido a la densidad de población que se concentra en esta área dada su cercanía con la frontera, donde la mayoría de las operaciones del sector comercial se llevan a cabo.



**Figura 36** Propuesta de red HAPS #1. Con 3 plataformas repartidas en la zona norte del estado de Baja California, de acuerdo con la cobertura propuesta en los casos de estudio.

Dirigiéndose hacia el sur del área se encuentran asentamientos rurales, un área protegida concurrida por senderistas e industria del sector agricultor, importante para la economía del estado, además de ser ruta para dirigirse hacia el estado de Baja California Sur donde existe mucha afluencia turística, y por lo tanto, es parte importante de la economía en el sector. La Figura 36 muestra dicha propuesta.

En la Figura 36 se muestra la concentración de HAPS sobre la frontera norte que cubre a las ciudades de Tecate, Ensenada y Mexicali principalmente, la primera es un área rural, y las otras dos son suburbanas. Mexicali tiene una geografía con terrenos mayormente planos que beneficia a los enlaces, esto aumenta la probabilidad de línea de vista, lo cual la propuesta podría dar servicio sin mucha diferencia a los resultados obtenidos en este trabajo de manera ideal. También, se encuentra rodeada de una importante conglomeración agrícola que pueden beneficiarse del servicio proveído por la plataforma como se observa en la Figura 37.

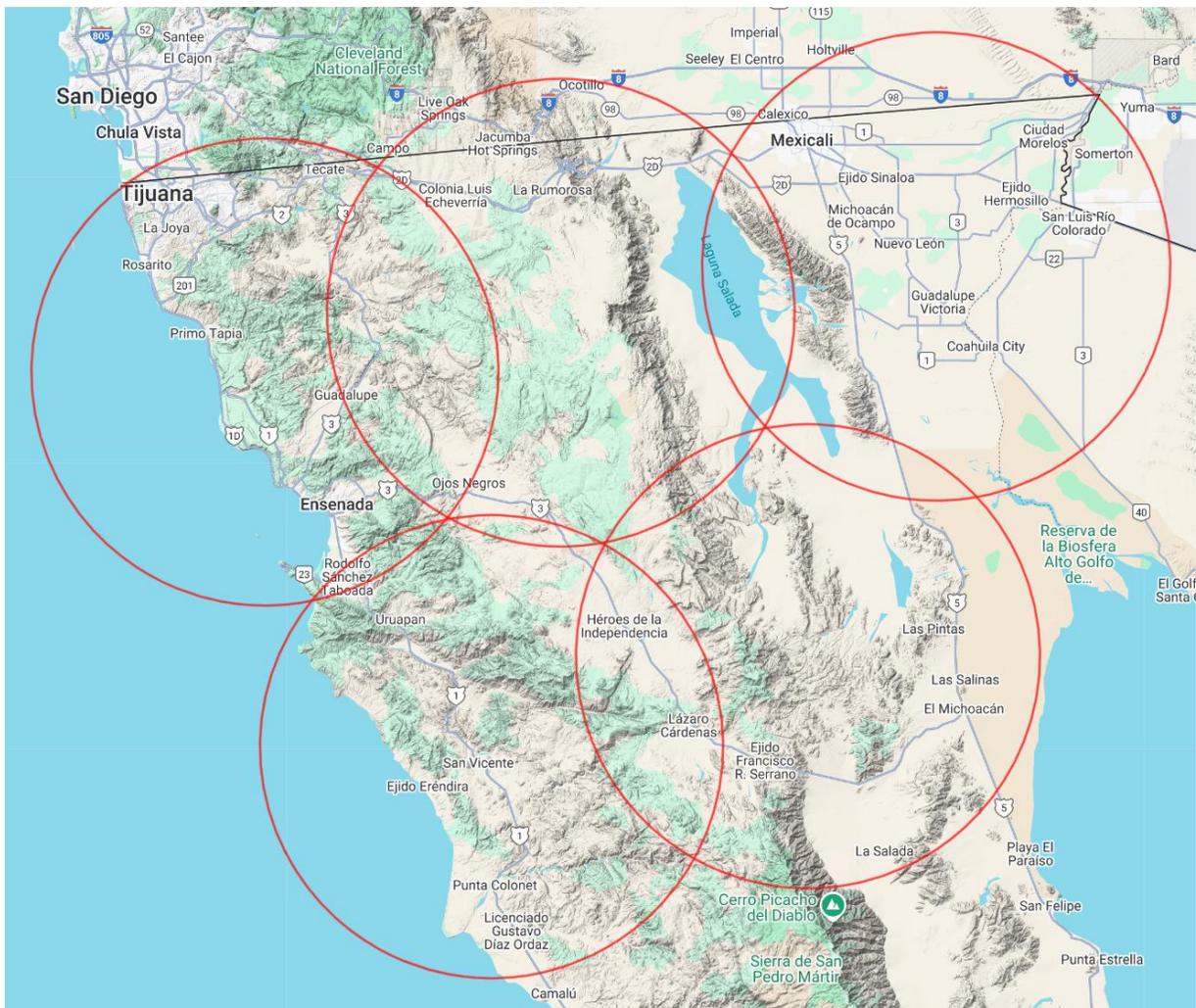


**Figura 37** Imagen satelital de zonas rurales en los alrededores de Mexicali.

Por otro lado, la ciudad de Ensenada está rodeada de un relieve montañoso que podría dificultar el establecimiento de enlaces con línea de vista, sin embargo, cabe resaltar que esta ciudad traería beneficios en costos de operación de las plataformas en conjunto con los poblados que están al norte de la ciudad.

La ciudad cuenta con un puerto marítimo importante para la región y el país, por lo que se consideró que existiría demanda a usuarios marítimos que llegan al puerto.

Tecate es un área rural que también está rodeada de relieves montañosos, este asentamiento es un punto intermedio entre Tijuana y Mexicali, además de tener su propia industria que podrían ser usuarios de dispositivos IoT para fábricas o agricultura inteligente. Por otro lado, la ciudad metropolitana de Tijuana contiene una densidad de usuarios superior a las tres ciudades mencionadas previamente, asimismo la propuesta puede no cumplir los requisitos de calidad en esta ciudad y por ende, no se consideró para ser atendida bajo esta propuesta ni las siguientes a pesar de cubrirla con el área de cobertura.



**Figura 38** Propuesta de red HAPS #2. Con 5 plataformas repartidas en la zona norte del estado de Baja California, de acuerdo con la cobertura propuesta en los casos de estudio.

La constelación HAPS mostrada en la Figura 38 se encuentra distribuida en la frontera norte de tal manera que asegure un buen desempeño en los enlaces inter-plataforma, en beneficio que estos no se ven

afectados por lluvias. Al sur de la red se encuentra con ejidos considerados zonas remotas, por lo que es difícil proveer de servicios con TN, pero con NTN sería factible. Existe la carretera federal número 5, la cual se vería parcialmente beneficiada con esta red.



**Figura 39** Propuesta de red HAPS #3. Con 5 plataformas repartidas en la zona norte y sur del estado de Baja California, de acuerdo con la cobertura propuesta en los casos de estudio.

Como resultado, los pobladores de la zona que recorre la carretera se verían beneficiados y cerraría la brecha digital existente, impulsando el comercio digital y posiblemente atrayendo a nuevos pobladores. Se contempló en esta propuesta extender la distancia entre HAPS lo mayor posible de acuerdo con los resultados obtenidos, con el fin de cubrir la mayor cantidad de área sin utilizar más plataformas. Si bien HAPS no sustituye en todas las aplicaciones a las TN por el momento, si es un buen complemento que apoyaría en la cobertura verdaderamente global de la visión 6G. La siguiente propuesta se observa en la Figura 39.

La Figura 39 muestra la propuesta de red sobre HAPS que beneficia la zona sur donde nuevamente se encuentran poblados remotos que difícilmente cuentan con servicio. Al considerarlos zonas rurales es muy probable proveer de servicio de buena calidad mediante este despliegue. Es importante mencionar a las zonas remotas donde se practican actividades de alpinismo, estas no cuentan con infraestructura terrestre que provea acceso a la red móvil, por lo que en una emergencia dentro de las zonas podría marcar la diferencia.

Este despliegue como los dos anteriores puede desempeñar las aplicaciones como agricultura inteligente con IoT, comunicaciones de emergencia, comunicaciones marítimas (en la costa Este frente a Ensenada y Tijuana) y acceso a la red móvil pública. Por otra parte, San Quintín y los asentamientos aledaños se verían favorecidos con esta propuesta, nuevamente reduciendo la brecha digital y atrayendo a nuevos pobladores a la región. Sin embargo, es necesario que las propuestas sean analizadas con mayor profundidad para determinar si son factibles, un simulador de redes sería requerido para demostrar las capacidades de la infraestructura propuesta. A simples rasgos se puede decir que este es un buen acercamiento a un despliegue funcional para aplicaciones de 5G, ya que la calidad del canal con la configuración dada en este trabajo permitiría enlaces de alta velocidad, y como consecuencia, también de baja velocidad de bits. Para finalizar, se realizó la Tabla G - 1 en Anexos donde se presentan algunas aplicaciones que pudiesen ser soportadas por estas propuestas.

## Capítulo 5. Conclusiones, contribuciones y trabajo a futuro

---

En este capítulo se muestran conclusiones, contribuciones, lo que se espera podría marcar el futuro de este trabajo y algunos de los desafíos que enfrenta la tecnología emergente HAPS.

### 5.1 Conclusiones

El acceso al Internet es reconocido como necesidad básica para la sociedad, lo que conlleva a cerrar la brecha digital en las comunidades, especialmente en zonas donde el acceso por redes terrestres es poco viable. Si bien, la infraestructura del ecosistema 5G es compleja debido al contexto dinámico, el interés de varios sectores por incorporarla lo más pronto posible hace que la tecnología HAPS sea vista como habilitadora de la IMT-2020 y un pilar para las futuras generaciones. Instituciones internacionales admiten la necesidad de continuar la investigación y desarrollo de la tecnología HAPS, para adecuarla a las diferentes regiones del mundo y regularla bajo la normatividad internacional. La 3GPP ha contribuido en el establecimiento de parámetros para las redes 5G y en la representación de las NTN para las comunicaciones inalámbricas, su aportación respecto a las NTN cambia el paradigma del entendimiento de las comunicaciones inalámbricas móviles, lo que supone una oportunidad para la innovación tecnológica.

Este trabajo da el primer paso para comprender la viabilidad y características de las redes aéreas sobre HAPS en territorio mexicano. No obstante, la implementación de la tecnología presenta retos complejos, que fueron abordados bajo un enfoque ideal y perspectiva de acceso satelital de manera teórica. Se diseñaron radioenlaces de RF para redes HAPS en formato HBS y se analizaron bajo cuatro casos de estudio en dieciséis escenarios con distintas configuraciones. El método ejecutado fue un análisis cuantitativo del desempeño de radioenlaces tierra–aire–tierra, donde se fabricó una herramienta que cometiera cálculos de cobertura, latencias por propagación, pérdidas por absorción de gases atmosféricos, pérdidas por lluvia, ganancia de antenas y, finalmente, el presupuesto de enlaces. Asimismo, los dieciséis escenarios fueron evaluados con la plataforma aérea a 20 km de altitud y con un ángulo mínimo del usuario de 20°, intercalando las características como modulación, tasas de lluvia, posición de usuario y la implementación de un nodo terrestre o la plataforma aérea sola.

Al realizar el análisis cuantitativo de los cuatro casos de estudio se concluye lo siguiente: En primer lugar, el análisis de cobertura comprobó que las plataformas aéreas en el rango de 17 km a 22 km de altitud proveen de una huella amplia en un rango de 58.5 km a 421.6 km de diámetro, dependiendo del ángulo mínimo de usuario. Por otra parte, el análisis de latencia por propagación demostró retardos menores a 1 ms para los 4 casos, por lo que los despliegues a 20 km de altitud pueden ser candidatos para proveer de servicios uRLLC. Pasando a los resultados de los presupuestos de enlaces, se observó que el cambio en modulación de manera ascendente (de QPSK a 256QAM) refleja un mejor desempeño en todos los casos de estudio, siendo causado por la reducción del ancho de banda afectado por el ruido. Además, se determinó que los nodos repetidores terrestres impactan negativamente en el CNR total cuando existen atenuaciones por lluvias torrenciales (95 mm/hr) y el usuario se encuentra al borde de cobertura, por lo que es mejor realizar un enlace directo a dispositivos desde la plataforma aérea.

Para los casos de estudio 1 y 2 donde el GW siempre está al borde de cobertura, se ve afectado en la calidad del enlace cuando se evalúa con lluvias torrenciales, se recomienda contar con dos plataformas aéreas donde el usuario o RN terrestre se encuentren en punto de sub-plataforma, resultando en una mejora del desempeño pero, aumenta la latencia por el incremento en la distancia recorrida por el radioenlace. Siguiendo la misma idea, no hay gran diferencia en el desempeño de los casos 3 y 4 cuando no hay fenómenos hidrometeorológicos, el enlace IPL muestra mantener el CNR total con un promedio de 22 dB y 15 dB respectivamente, siendo mayor a 10 dB el sistema está capacitado para las comunicaciones de alta velocidad de bits en primera instancia. Una sola plataforma aérea es capaz de mantener un buen desempeño con cobertura amplia aunque existan lluvias torrenciales, siempre y cuando el UE o RN terrestre se encuentre bajo la plataforma o lo más cercano del punto sub-plataforma. Aunque la coexistencia con TN diezma el CNR total del sistema (19 dB en promedio para el caso 2 y 15 dB para el caso 4), se puede contrarrestar con la implementación de otra plataforma cuando existen lluvias torrenciales, ya que el enlace IPL presenta condiciones que mejoran la calidad del canal.

Por último, cabe destacar que el desempeño en los casos 2 y 4 en los escenarios 13 al 16 no cumplieron con el mínimo de 7 dB del presupuesto de enlaces, esto da pie a que se considere la opción de aumentar la latencia para mantener un buen desempeño siempre y cuando se mantengan los parámetros de QoS para cada servicio o aplicación 5G. Los resultados demuestran que se debe considerar una constelación dinámica de HAPS bajo demanda que se mueva a las áreas de interés de acuerdo con los factores como, densidad de usuarios, coexistencia con redes terrestres, clima del área y costo de operación del despliegue, y por lo tanto, es poco factible cubrir toda la república mexicana con un diámetro de cobertura constante por plataforma.

De acuerdo con las conclusiones anteriores, se logró completar los objetivos específicos planteados al principio de este trabajo. Los capítulos 2 y 3 describieron la tecnología HAPS, así como los subsistemas aeronáuticos y de comunicaciones de manera general, sin embargo hace falta más información con los detalles técnicos de las capacidades de la carga útil enfocada a servicios HIBS, por lo que se cubrió parcialmente con información existente de manera pública. En cambio, se logró cumplir en su totalidad el resto de los objetivos específicos, se diseñó una red interoperable terrestre–aérea bajo diferentes frecuencias asignadas por la normatividad internacional y regional, se calcularon y analizaron distintas huellas de cobertura y latencias primeramente, para después hacerlo con los radioenlaces RF bajo diferentes escenarios en los cuatro casos de estudio.

Por otra parte la herramienta de esta tesis presenta los siguientes retos: el primero, es que el ingreso de parámetros en la herramienta es manual lo que pudiera entorpecer la visualización de resultados, así como su análisis. El segundo reto, los modelos utilizados para determinar las atenuaciones por lluvia son factibles en la teoría únicamente, a pesar de esto siguen siendo recibidos como buenas aproximaciones en la predicción del desempeño de sistemas espaciales y aéreos. El tercer reto es que no se consideró el rango de errores de bits o símbolos, la saturación de símbolos en el receptor y el consumo de energía de las plataformas, por lo que es necesario un análisis enfocado a estas secciones del despliegue. El último reto, es que la mayoría de los parámetros y condiciones fueron considerados como ideales, en la práctica esto no existe por lo que se requiere de *software* especializado para simular condiciones realistas que determine el desempeño global de los despliegues.

## 5.2 Contribuciones

Si bien el enfoque presentado fue desde una perspectiva general y teórica, a continuación, se expresan las contribuciones de esta tesis en el área de las comunicaciones inalámbricas sobre HAPS para redes 5G: se reconoció las necesidades de un sistema aéreo, examinando los parámetros comprometidos a nivel de *hardware*, además de conocer de manera general el nivel lógico gestionado por *software*, así como la implementación de las redes aéreas en coexistencia con las terrestres, esto mediante el análisis del uso de frecuencias asignadas a nivel internacional y regional. También, se describió a los elementos, arquitectura, complementos y demás actores a nivel físico del sistema que otorga el control de características como cobertura, latencia y presupuesto de enlaces.

A su vez, se logró determinar la capacidad de los HAPS en su formato HIBS para realizar enlaces directos a dispositivos a pesar de presentarse lluvias torrenciales en el clima, lo que significa un primer paso hacia el desarrollo de despliegues HAPS en regiones mexicanas como redes de emergencia que atiendan zonas de desastres. Es importante destacar esto último, ya que al contar con plataformas áreas aumentaría la resiliencia de la infraestructura de telecomunicaciones en México, aportando a la seguridad social y, por lo tanto, a la seguridad nacional. Continuando con las contribuciones, se propusieron 3 tipos de redes HAPS, las cuales se distribuyeron heurísticamente considerando zonas geográficas importantes en relación con el sector económico, asentamientos remotos, asentamientos rurales y carreteras principales del estado de Baja California, México. Para finalizar, este trabajo de investigación generó dos presentaciones en representación de CICESE y CONAHCyT, la primera fue expuesta en la Semana Mundial del Espacio celebrado por la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California el día 3 de Octubre de 2023, y la segunda, fue presentada en la celebración Casa Abierta del Departamento de Física Aplicada de CICESE el 24 de Mayo de 2024, donde se presentó un póster con relación al trabajo.

### **5.3 Desafíos por superar**

Al ser una tecnología emergente, existen desafíos que deben ser superados mediante investigación y desarrollo intensivo de nuevas técnicas y equipos especiales. Asimismo, se complica aún más debido al secretismo de las compañías participantes del área, claramente no existe una única opción, pero solo queda especular la solución para integrar las múltiples tecnologías a estos sistemas hasta que exista más información. Sin embargo, el artículo de Karabulut Kurt et al. (2021) presenta cuestiones sin resolver y añade algunas de estas ideas especulativas respecto a la solución. Por ejemplo, la asignación de bandas de frecuencia por la UIT es crítica, las bandas para HAPS deben ser cuidadosamente planeadas para proteger las investigaciones de radioastronomía sin ocasionar interferencias. Por otra parte, los diferentes tipos de HAPS vienen con compromisos en mayor o menor medida en sus capacidades de la carga útil y especificaciones en el consumo de energía que dependen del tipo de plataforma, el costo y el tiempo de operación de vuelo, por lo que es necesario tenerlas en cuenta a la hora de diseñar la aeronave. Respecto al diseño de ondas de RF, aún no existe una forma de onda específica para HIBS. El estado del arte cuenta con una brecha de conocimiento respecto a la gestión de recursos radioeléctricos y de interferencia, se ha enfatizado el uso de IA y aprendizaje de máquinas en la integración entre redes aéreas, espaciales y terrestres como solución. Por otro lado, hace falta un modelo de canal fácil de usar, universalmente aceptado y fundamentado en la práctica que facilite la evaluación del rendimiento, por ejemplo, usar herramientas más sofisticadas para evaluar el rendimiento de las redes verticales heterogéneas y SAGIN.

Las comunicaciones masivas MIMO es una de las tecnologías disruptivas que permitiría incrementar la capacidad de crecimiento de 5G hasta 1,000 veces. Sin embargo, está siendo desarrollada en el contexto de la infraestructura terrestre y podría no ser adecuada para aplicaciones HAPS. Otro de los factores habilitadores de la tecnología NR son las comunicaciones a través de ondas milimétricas, pero requieren de un seguimiento de haces rápido, preciso y de bajo costo, sin esto las comunicaciones podrían comprometerse, o peor, perderse. Respecto a las limitaciones de energía a bordo y el peso permitido de la carga útil, presentan retos sin precedentes para la gestión de redes HAPS, así nace la necesidad de desarrollar un algoritmo inteligente autoorganizativo de control para optimizar los recursos de red y el despliegue HAPS respecto a sus funciones y responsabilidades. Por otra parte, la gestión de transferencia de celdas en escenarios simples depende de técnicas dinámicas de conformación de haces, dichas técnicas son utilizadas para reducir las frecuencias en la transferencia de celdas para un gran número de usuarios. Por último, en el caso hipotético de que un nodo HAPS se vea comprometido, la integridad de las comunicaciones que pasan por él se verían afectadas además del gran número de usuarios.

## 5.4 Trabajo futuro

Después del estudio y diseño realizados se pueden considerar los siguientes trabajos futuros:

- Realizar un algoritmo con interfaz gráfica capaz de calcular los presupuestos de enlace con factores predeterminados o al gusto del usuario bajo el esquema de redes HAPS.
- Diseñar antenas adecuadas a las aplicaciones de enlaces tierra–aire y aire–espacio.
- Realizar una prueba experimental de enlaces tierra–aire utilizando una plataforma aérea de baja altitud conectada a un nodo terrestre con las mismas funcionalidades de una estación base de los operadores móviles regionales.
- Extender el enfoque de esta investigación agregando el dinamismo en sus diferentes capas del ecosistema 5G.
- Realizar una simulación con valores predefinidos que establezcan las capacidades de enrutamiento de los despliegues aquí mostrados.
- Realizar un estudio de mercado, predisposición de la aceptación de la tecnología emergente y futuras aplicaciones aplicado en México.
- Realizar propuestas de argumentos sobre calidad de servicio y calidad de experiencia en HAPS/HIBS 5G y 6G.

## Literatura citada

- Agiwal, M., Roy, A., & Saxena, N. (2016). Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials* (Vol. 18, Número 3, pp. 1617–1655). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
- Agrawal, A. (2018). *RF Planning and Optimization in GSM and UMTS Networks*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36191.51361>
- Alam, M. S., Kurt, G. K., Yanikomeroglu, H., Zhu, P., & Dao, N. D. (2021). High altitude platform station based super macro base station constellations. *IEEE Communications Magazine*, 59(1), 103–109. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000542>
- Anjum, M. J., Anees, T., Tariq, F., Shaheen, M., Amjad, S., Iftikhar, F., & Ahmad, F. (2023). Space-Air-Ground Integrated Network for Disaster Management: Systematic Literature Review. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2023, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2023/6037882>
- Aranda, J., Sacoto Cabrera, E. J., Haro Mendoza, D., & Astudillo Salinas, F. (2021). Redes 5G: una revisión desde las perspectivas de arquitectura, modelos de negocio, ciberseguridad y desarrollos de investigación. *NovasinerGía Revista digital de Ciencia, Ingeniería y Tecnología*, 4(1), 6–41. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.01>
- Arum, S. C., Grace, D., & Mitchell, P. D. (2020). A review of wireless communication using high-altitude platforms for extended coverage and capacity. *Computer Communications* (Vol. 157, pp. 232–256). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.04.020>
- Atala, M., Cecilia, V., & Gema, C. (s/f). *La Opinión - Eficiencia energética: ¿cómo una red con más datos consume menos energía?* Prensa Ibérica. Recuperado el 5 de agosto de 2024, de <https://www.laopinioncoruna.es/ideas/eficiencia-energetica/index.html>
- BAE Systems. (2024). PHASA-35. Prismatic. <https://www.prismaticltd.co.uk/phasa-35/>
- Bellemare, M. G., Candido, S., Castro, P. S., Gong, J., Machado, M. C., Moitra, S., Ponda, S. S., & Wang, Z. (2020). Autonomous navigation of stratospheric balloons using reinforcement learning. *Nature*, 588(7836), 77–82. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2939-8>
- Cao, X., Yang, P., & Su, X. (2023). *Survey on Near-Space Information Networks: Channel Modeling, Networking, and Transmission Perspectives*. <http://arxiv.org/abs/2310.09025>
- Comisión Nacional del Agua. (2010). *Mapas de climatología 1981-2010*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/mapas-de-climatologia-1981-2010>
- Conte Galván, R. (2020). *Satélites, propagación atmosférica y efectos en las señales de radio*. Zenodo. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.13883346>
- Cui, H., Zhang, J., Geng, Y., Xiao, Z., Sun, T., Zhang, N., Liu, J., Wu, Q., & Cao, X. (2022). Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: Requirements, architecture and challenges. *China Communications*, 19(2), 90–108. <https://doi.org/10.23919/JCC.2022.02.008>

- D'Oliveira, F. A., De Melo, F. C. L., & Devezas, T. C. (2016). High-altitude platforms — Present situation and technology trends. *Journal of Aerospace Technology and Management* (Vol. 8, Número 3, pp. 249–262). Departamento de Ciencia e Tecnologia Aeroespacial. <https://doi.org/10.5028/jatm.v8i3.699>
- ETSI. (2023). *TR 121 917 - V17.0.1 Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; 5G*. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/121900\\_121999/121917/17.00.01\\_60/tr\\_121917v170001p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/121900_121999/121917/17.00.01_60/tr_121917v170001p.pdf)
- ETSI. (2024). *TR 138 921 - V18.0.1 5G; Study on International Mobile Telecommunications (IMT) parameters for 6.425 - 7.025 GHz, 7.025 - 7.125 GHz and 10.0 - 10.5 GHz*. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/138900\\_138999/138921/18.00.01\\_60/tr\\_138921v180001p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138921/18.00.01_60/tr_138921v180001p.pdf)
- ETSI. (2025a). *TS 122 261 - V18.16.0 5G; Service requirements for the 5G system*. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/122200\\_122299/122261/18.16.00\\_60/ts\\_122261v181600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122200_122299/122261/18.16.00_60/ts_122261v181600p.pdf)
- ETSI. (2025b). *TS 138 101-1 - V18.8.0 User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone*. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/13810101/18.08.00\\_60/ts\\_13810101v180800p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/13810101/18.08.00_60/ts_13810101v180800p.pdf)
- ETSI. (2025c). *TS 138 101-5 - V18.8.0 User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 5: Satellite access Radio Frequency (RF) and performance requirements*. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/13810105/18.08.00\\_60/ts\\_13810105v180800p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/13810105/18.08.00_60/ts_13810105v180800p.pdf)
- ETSI. (2025d). *TS 138 300 - V18.4.0 NR and NG-RAN Overall description*. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138300\\_138399/138300/18.04.00\\_60/ts\\_138300v180400p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138300/18.04.00_60/ts_138300v180400p.pdf)
- Euler, S., Lin, X., Tejedor, E., & Obregon, E. (2022). High-Altitude Platform Stations as International Mobile Telecommunications Base Stations: A Primer on HIBS. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 17(4), 92–100. <https://doi.org/10.1109/MVT.2022.3202004>
- Galaxy Unmanned Systems. (2024, agosto 8). *A.I.R.S.H.I.P.<sup>2</sup>: Ready for Launch!* <https://www.galaxyuas.com/post/a-i-r-s-h-i-p-ready-for-launch>
- Giuliano, R. (2024). From 5G-Advanced to 6G in 2030: New Services, 3GPP Advances, and Enabling Technologies. *IEEE Access*, 12, 63238–63270. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3396361>
- Grace, D., & Mohorcic, M. (2010). *Broadband Communications via High Altitude Platforms* (D. Grace & M. Mohorčič, Eds.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470971840>
- GSMA. (2022). *High Altitude Platform Systems Towers in the Skies*. <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/wp-content/uploads/2022/02/HAPS-Towers-in-the-skies-draft-v-2.1-clean.pdf>
- HAPS Alliance. (2020). *Overview “HAPS Alliance - An Alliance for the Greater Good”*. <https://hapsalliance.org/overview/>
- HAPS Alliance. (2022). *Guidelines for Payload Operation in the Stratosphere*. <https://hapsalliance.org/blog/new-haps-alliance-white-paper-delivers-guidance-for-payload-operation-in-the-stratosphere/>

- HAPS Alliance. (2024). *Acceptable Levels of Risk for HAPS*. <https://hapsalliance.org/wp-content/uploads/formidable/12/Acceptable Levels of Risk for HAPS 2024.pdf>
- Hasan, M. S., Svorcan, J., Tanovic, D., Bař, G., & Durakbasa, N. M. (2020). Conceptual Design and Fluid Structure Interaction Analysis of a Solar Powered High-Altitude Pseudo-Satellite (HAPS) UAV Wing Model. En N. Durakbasa & G. Gençyılmaz (Eds.), *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 93–105). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-62784-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62784-3_8)
- Hemaddeh, I. A., Satyanarayana, K., El-Hajjar, M., & Hanzo, L. (2018). Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(2), 870–913. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783541>
- Huang, Q., Youcef Belmekki, B. E., Eltawil, A. M., & Alouini, M.-S. (2024). System-Level Metrics for Non-Terrestrial Networks Under Stochastic Geometry Framework. *IEEE Communications Magazine*, 62(8), 148–154. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300561>
- Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2018). *Uso de las Tecnologías de la Información en Situaciones de Emergencia: Experiencia Internacional*. <https://www.ift.org.mx/conocenos/pleno/otros-documentos/javier-juarez-mojica/uso-de-las-tecnologias-de-la-informacion-en-situaciones-de-emergencia-experiencia-internacional>
- Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2024a). *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF)*. <https://cnaf.ift.org.mx/>
- Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2024b). *¿Qué es 5G? Sensor 5G*. [https://sensor5g.ift.org.mx/que\\_es\\_5g](https://sensor5g.ift.org.mx/que_es_5g)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). ¿Qué hay en las localidades rurales de México? *Censo de Población y Vivienda, 2024*, 1–20. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/889463915119.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463915119.pdf)
- Iskandar, Azzahra, M. A., Palinggi, S. B., & Dewantari, A. (2022). On the Analysis of IMT-2020 (5G) Mobile Broadband Coexistence Between Cellular Terrestrial and HIBS. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 14(4), 753–769. <https://doi.org/10.15676/ijeei.2022.14.4.2>
- Jull, G. W. (1985). *CRC report ; No. 1393*. publications.gc.ca/pub?id=9.882492&sl=0
- Karabulut Kurt, G., Khoshkholgh, M. G., Alfattani, S., Ibrahim, A., Darwish, T. S. J., Alam, M. S., Yanikomeroglu, H., & Yongacoglu, A. (2021). A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(2), 729–779. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3066905>
- Kumar, A., Gaur, N., & Nanthaamornphong, A. (2024). Improving the latency for 5G/B5G based smart healthcare connectivity in rural area. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57641-7>
- Leishman, G. (2023). *Introduction to Aerospace Flight Vehicles*. Embry-Riddle Aeronautical University. <https://doi.org/10.15394/eaglepub.2022.1066>

- Liao, L., & Pasternak, I. (2009). A review of airship structural research and development. *Progress in Aerospace Sciences* (Vol. 45, Números 4–5, pp. 83–96). <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2009.03.001>
- Lin, X., Rommer, S., Euler, S., Yavuz, E. A., & Karlsson, R. S. (2021). 5G from Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(4), 147–153. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.011.2100038>
- Lin, X., Yu, D., & Wiemann, H. (2020). A Primer on Bandwidth Parts in 5G New Radio. *5G and Beyond*, 357–370. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.00761>
- Loon. (2020). *The Stratosphere High Altitude, Higher Ambitions*. [www.loon.com](http://www.loon.com)
- Lou, Z., Youcef Belmekki, B. E., & Alouini, M.-S. (2023). HAPS in the Non-Terrestrial Network Nexus: Prospective Architectures and Performance Insights. *IEEE Wireless Communications*, 30(6), 52–58. <https://doi.org/10.1109/MWC.004.2300198>
- Mingxiang, G., Fang, Y., & Qing, G. (2009). Performance of coverage and wireless link for HAPS communication. *2009 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2009.5371417>
- nextSvg. (2024, enero 12). *Rutas del Aeropuerto Internacional de Tijuana*. nextSvg. <https://nextsvg.com/customize-airport-es.php?p1=TIJ>
- Noll, T. E., Brown, J. M., Perez-Davis, M. E., Ishmael, S. D., Tiffany, G. C., & Gaier, M. (2004). *Investigation of the Helios Prototype Aircraft Mishap*. <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-068-DFRC.html>
- Nomikos, N., Michailidis, E. T., Vouyioukas, D., & Kanatas, A. G. (2013). Performance Analysis of a Two-Hop MIMO Mobile-to-Mobile via Stratospheric-Relay Link Employing Hierarchical Modulation. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2013/935609>
- Oficina de Radiocomunicaciones del UIT. (1994). *Recomendación UIT-R P.837-1 Características de la precipitación para establecer modelos de propagación*. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-1-199408-S!!PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-1-199408-S!!PDF-S.pdf)
- Oficina de Radiocomunicaciones del UIT. (2000). *F.1500 - Características preferidas de los sistemas del servicio fijo que utilizan plataformas de gran altitud en las bandas 47,2-47,5 GHz y 47,9-48,2 GHz*. <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>
- Oficina de Radiocomunicaciones del UIT. (2007). *Recomendación UIT-R P.676-7 Atenuación debida a los gases atmosféricos*. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-7-200702-S!!PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-7-200702-S!!PDF-S.pdf)
- Oficina de Radiocomunicaciones del UIT. (2015). *Recomendación UIT-R M.2083-0 Concepción de las IMT–Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020 y en adelante*. <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>
- Oficina de Radiocomunicaciones del UIT. (2023). *Conferencia mundial de radiocomunicaciones 2023 (CMR-23) Actas finales*. <https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/pages/publications.aspx?parent=R-ACT-WRC.16-2024&media=electronic>

- Organización de Aviación Civil Internacional. (2015). *Documento 10019 AN/507 - Manual sobre Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS)*. <https://store.icao.int/en/manual-on-remotely-piloted-aircraft-systems-rpas-doc-10019>
- Patra, T., & Mitra, S. K. (2020). Link Budget Analysis for 5G Communication in the Tropical Regions. *Wireless Communications and Mobile Computing, 2020*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/6669965>
- Pidwirny, M., Pidwirny, M., & University of British Columbia. (2021). *Physical Geography Lab Manual: The Atmosphere and Biosphere* (1a ed.). Our Planet Earth. <https://pressbooks.bccampus.ca/physgeoglabmanual1/>
- Qiu, J., Grace, D., Ding, G., Zakaria, M. D., & Wu, Q. (2019). Air-Ground Heterogeneous Networks for 5G and beyond via Integrating High and Low Altitude Platforms. *IEEE Wireless Communications, 26*(6), 140–148. <https://doi.org/10.1109/MWC.0001.1800575>
- Rajatheva, N., Atzeni, I., Bjornson, E., Bourdoux, A., Buzzi, S., Dore, J.-B., Erkucuk, S., Fuentes, M., Guan, K., Hu, Y., Huang, X., Hulkkonen, J., Jornet, J. M., Katz, M., Nilsson, R., Panayirci, E., Rabie, K., Rajapaksha, N., Salehi, M., ... Xu, W. (2020). *White Paper on Broadband Connectivity in 6G*. <http://arxiv.org/abs/2004.14247>
- Saad, M. M., Tariq, M. A., Khan, M. T. R., & Kim, D. (2024). Non-Terrestrial Networks: An Overview of 3GPP Release 17 & 18. *IEEE Internet of Things Magazine, 7*(1), 20–26. <https://doi.org/10.1109/iotm.001.2300154>
- Salas-Natera, M. A., Macein, G. L., & Rodriguez-Osorio, R. M. (2022). On the design of HAPs High Throughput and flexible 5G Communication Payloads. *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 1–5. <https://doi.org/10.23919/EuCAP53622.2022.9769360>
- Sanny Telecom. (2024). *1.8m Ultra High Performance Antenna Dual Polarized, 5.85 ~ 7.2GHz*. <https://www.sannytelecom.com/parabolic-dish-antennas/>
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2003). *Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCT3-2002*. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=695526&fecha=14/05/2003#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=695526&fecha=14/05/2003#gsc.tab=0)
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2013). *Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT3-2012*. [https://dof.gob.mx/normasOficiales/4830/sct11\\_C/sct11\\_C.htm](https://dof.gob.mx/normasOficiales/4830/sct11_C/sct11_C.htm)
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2019). *Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019*. [https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/8006/sct11\\_C/sct11\\_C.html](https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/8006/sct11_C/sct11_C.html)
- Sun, Z., & Giambene, G. (2024). Performance Evaluation of QoS/QoE and KPIs for 6G Satellite Networks. *IEEE Future Networks Tech Focus, 17*, 1–6. [https://futurenetworks.ieee.org/images/files/Tech\\_Focus\\_Articles/PDFs/issue17/july2024\\_article\\_4.pdf](https://futurenetworks.ieee.org/images/files/Tech_Focus_Articles/PDFs/issue17/july2024_article_4.pdf)
- Thales Alenia Space. (2017, marzo 17). *What's Up With Stratobus?* <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/whats-stratobus>
- Thornton, J., Grace, D., Capstick, M. H., & Tozer, T. C. (2003). Optimizing an array of antennas for cellular coverage from a high altitude platform. *IEEE Transactions on Wireless Communications, 2*(3), 484–492. <https://doi.org/10.1109/TWC.2003.811052>

- Tozer, T. C., & Grace, D. (2001). High-altitude platforms for wireless communications. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 13(3), 127–137. <https://doi.org/10.1049/ecej:20010303>
- Vakada, D. (2025, enero 31). *RSRP vs RSRQ vs RSSI*. Wireless Theory. <https://wirelesstheory.com/rsrp-vs-rsrq-vs-rssi/>
- Velev, D., Zlateva, P., & Zong, X. (2018). Challenges of 5G usability in disaster management. *ACM International Conference Proceeding Series*, 71–75. <https://doi.org/10.1145/3194452.3194475>
- VOA News. (2015, marzo 9). *Solar Plane Completes First Leg of World Tour*. VOA. <https://www.voanews.com/a/solar-powered-plane-lifts-off-on-world-tour/2672767.html>
- World Economic Forum. (2024). *Top 10 Emerging Technologies of 2024*. <https://www.weforum.org/publications/top-10-emerging-technologies-2024/>
- World Meteorological Organization. (2024). WMO Global Annual to Decadal Climate Update. *WMO*, 1–27. <https://library.wmo.int/idurl/4/68910>
- X Company. (2024). *Loon Expanding internet connectivity with stratospheric balloons*. Google LLC. <https://x.company/projects/loon/>
- Xiao, Z., Mao, T., Han, Z., & Xia, X.-G. (2022). Near Space Communications (NS-COM): A New Regime in Space-Air-Ground Integrated Network (SAGIN). *IEEE Wireless Communications*, 29(6), 38–45. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2200142>
- Yahia, O. Ben, Erdogan, E., Kurt, G. K., Altunbas, I., & Yanikomeroğlu, H. (2022). HAPS Selection for Hybrid RF/FSO Satellite Networks. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58(4), 2855–2867. <https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3142116>
- Yuxuan, F. (2023, noviembre 20). *Un nuevo capítulo en el desarrollo de las redes 5G/6G/NTN, el espacio y la tierra complementan las comunicaciones móviles*. <https://www.2cm.com.tw/2cm/zh-tw/market/F06FD51F15CB43DDB82F454A23911DB1/>
- Zhao, Y., Zhai, W., Zhao, J., Zhang, T., Sun, S., Niyato, D., & Lam, K.-Y. (2020). *A Comprehensive Survey of 6G Wireless Communications*. <http://arxiv.org/abs/2101.03889>

## Anexos

**Tabla A - 1** Cronología de proyectos HAPS.

Proyecto y Organización	Periodo	Descripción	Fuente
<b>Stationary High Altitude Relay Platform (SHARP)</b> Communication Research Center (CRC)	1980 - 1987	Fue el primer HAPS aerodino en ser energizado mediante enlaces por microondas. Se pensaba que operara a una altitud de 21 km y que cubriera 300 km de radio.  Después de varios vuelos exitosos, demostró que era posible enlaces de comunicaciones durante.  Pero se canceló por una crisis presupuestaria.	(Karabulut Kurt et al., 2021)
<b>HALO</b> Angel Technologies	199? - 1999	Aeronave convencional tripulada con antena 3G instalada. Planeada para redes rurales con misiones de 8 horas de duración.  Se cree que su modelo de negocio no fue adecuado para misiones tripuladas.	(Grace & Mohorcic, 2010)
<b>Pathfinder, Centurion &amp; Helios</b> Aeroviroment y Environmental Research Aircraft and Sensor Technology (ERAST)	1994 - 2003	Su objetivo fue diseñar un aerodino capaz de mantenerse por energía solar.  En 2002 fue el primer HAPS en llegar a una altitud de 20 km, donde pudo sostener los servicios de televisión en alta definición, voz de 3G, video y datos, y conectividad de alta velocidad a Internet.	(Karabulut Kurt et al., 2021)

**Tabla A - 2** Cronología de proyectos HAPS.

Proyecto y Organización	Periodo	Descripción	Fuente
<b>HISENTINEL80</b> US Army	1996 - 2012	El propósito de este proyecto fue el desarrollo de una aeronave no tripulada de bajo costo. Debía ser capaz de alzar cargas útiles de 9 hasta 90 kg. Realizó pruebas de comunicaciones militares, la cual era abastecida con 50 W. El proyecto acabó repentinamente debido al corte de financiamiento.	(Smith et al., 2011)
<b>SkyStation</b> SkyStation International	1997 - 1998	Proyecto que consistió en un aerostático con tecnología 3G, podía proveer 150 km de radio de cobertura a una altitud de operación de 20 km. Arreglo de 700 antenas alimentadas por energía solar, este proyecto fue el que impulso las regulaciones de HAPS de la UIT-R.	(Grace & Mohorcic, 2010)
<b>SkyNet</b> National Aerospace Laboratory (NAL) & Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	1998 - 2005	El proyecto consistió en la implementación de una red área con soporte para comunicaciones futuras de aquel entonces. La red estaría compuesta por una flotilla de HAPS aerostáticos con una duración de 3 años de vida, a 20 km de altitud cubriría un radio de hasta 100 km. Sufrió de problemas en el presupuesto después de haberse cumplido la mayoría de las fases para su finalización.	(Karabulut Kurt et al., 2021)

**Tabla A - 3** Cronología de proyectos HAPS.

Proyecto y Organización	Periodo	Descripción	Fuente
<b>Thunderhead Balloon System</b> Raven Aerostar	200? - Vigente	Tiene como propósito redefinir las misiones estratosféricas y proporciona una persistencia efectiva ante su costo apostando por un HAPS globo. Tecnología LTE a ~22 km de altura que ha demostrado proveer conexión a Internet a poblaciones apartadas, negadas o afectadas por desastres.	(Cao et al., 2023)
<b>Stratsat</b> ATG	2001 - 2005	Aerostático con tecnología 3G, capaz de operar a una altitud de 20 km. Llevaba a bordo un sistema híbrido solar/diésel, en su diseño este debía ser suficiente para mantener la aeronave en operación por 5 años.	(Grace & Mohorcic, 2010)
<b>Elevate</b> Zero 2 Infinity	2009 - Vigente	Provee el servicio de transportación de carga útil a la estratósfera mediante un globo, esto para validar y probar diferentes tecnologías relacionadas con HAPS. En su versión STRATOS puede elevar hasta 100 kg a un rango de 18-22 km de altitud en su máxima capacidad durante 24 horas. La compañía ofrece diferentes opciones en términos de altitud, duración y peso de la carga útil según los requisitos del cliente.	(Karabulut Kurt et al., 2021)

**Tabla A - 4** Cronología de proyectos HAPS.

Proyecto y Organización	Periodo	Descripción	Fuente
<b>A.I.R.S.H.I.P.<sup>2</sup></b> Galaxy Unmanned Systems LLC	20?? - Vigente	Se prevé que comience su recorrido alrededor del mundo este año. Su diseño esta “bio-inspirado” por la naturaleza haciéndolo regenerativo. Equipado con IA y su poder 100% obtenido de energía renovable, esta iniciativa pretende demostrar su capacidad de autonomía realizando un viaje alrededor del globo.	(Galaxy Unmanned Systems, 2024)
<b>Loon</b> X Company	2011 - 2021	Tenía como misión conectar a las personas en cualquier lugar utilizando una red de HAPS aerostáticos desarrollándose hasta su madurez cuya flotilla estaba constituida por una red de mallas. Dio cobertura a 300,000 usuarios, siendo su máxima duración de 312 días a un rangop de 18-23 km de altitud con cobertura de 40 km de radio. En 2019 completó 1 millón de horas de vuelo recorriendo un total de 40 millones de km.	(Karabulut Kurt et al., 2021)
<b>Zephyr S</b> Airbus Defense and Space	2013 - Vigente	Uno de sus objetivos es conectar a las personas aisladas alrededor del mundo. Registró el vuelo continuo de mayor duración en cualquier HAPS aerodino, donde su vuelo inaugural fue de 25 días. Transmitió a una velocidad de 100 Mbps con 12 kg como carga útil durante 100 días ininterrumpidos. Con una envergadura de 25 m, puede mantener una altitud superior a 18 km alimentándose de energía solar y baterías secundarias recargables a 250 W de potencia máxima de carga útil.	(Karabulut Kurt et al., 2021)

**Tabla A - 5** Cronología de proyectos HAPS.

Proyecto y Organización	Periodo	Descripción	Fuente
<b>Wireless Infrastructure Platform (WIP)</b> Avealto Ltd.	2013 - Vigente	HAPS aerostático capaz de proveer servicios LTE y 5G. A un rango de 18-22 km de altitud daría cobertura de 240 km de diámetro.  Pensado para que opere de 3 a 6 meses con una capacidad mínima de 55 kg de carga útil de manera autónoma.	(Cao et al., 2023)
<b>Aquila</b> Meta	2014 - 2018	Su objetivo fue proveer cobertura de banda ancha con un globo a zonas remotas con un radio de 80 km en 90 días de vuelo. Se pretendía que de día se mantuviera a 27 km y en la noche bajara hasta 18 km.  Tras varias pruebas exitosas, el proyecto terminó para que se trabajara en una asociación con Airbus.	(Karabulut Kurt et al., 2021)
<b>Stratobus</b> Thales Alenia Space	2014 - Vigente	Uno de sus objetivos es proporcionar servicios de comunicaciones 5G. A una altitud de 20 km puede cubrir 500 km de diámetro.  Este aerostático tiene 115 m de longitud y 34 m de ancho, puede realizar misiones de 5 años de duración con una carga máxima de 450 kg con mantenimiento anual.	(Karabulut Kurt et al., 2021)

**Tabla A - 6** Cronología de proyectos HAPS.

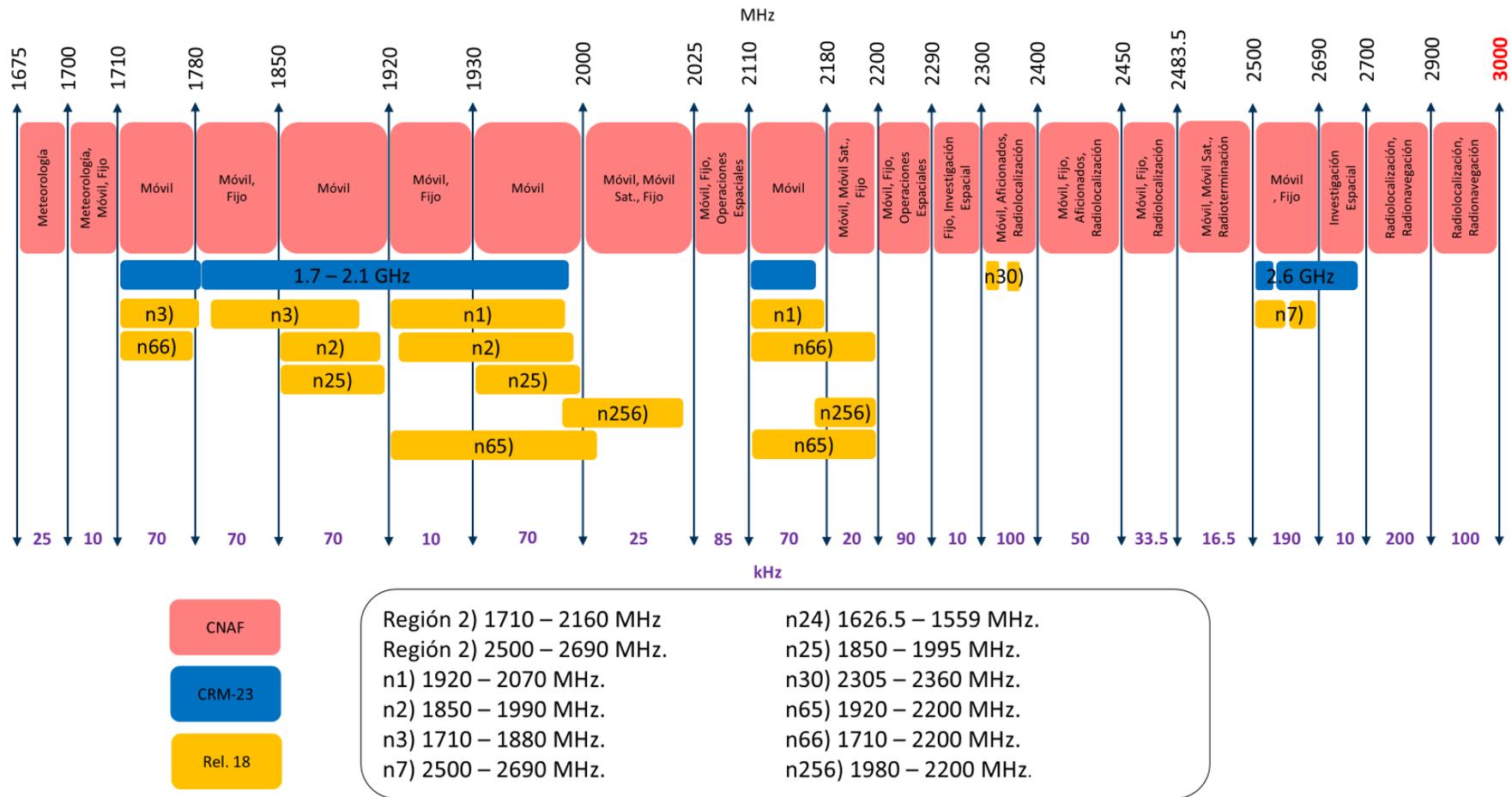
Proyecto y Organización	Periodo	Descripción	Fuente
<b>Yuanmeng</b> Beihang University & Beijing Aerospace Technology Company	2016 - 2020	Aerostático con un volumen de aproximadamente 18,000 m <sup>3</sup> , dándole capacidad de carga de 300 kg. Funciona mediante fotoceldas en el día y con celdas de hidrógeno por la noche durante 6 meses de operación. Cuenta con sistemas a bordo para comunicaciones de banda ancha, repetidor, observación de alta definición e imágenes espaciales.	(Cao et al., 2023)
<b>Sunglider</b> SoftBank Corp.	2017 - Vigente	Un HAPS aerodino que se usó para proveer por primera vez conectividad LTE. Con una envergadura de 78 m puede durar varios meses en vuelo. En 2020 completo un vuelo de casi 6 horas donde estuvo a 19 km de altura. SoftBank Corp. absorbió HAPSMobile en 2023 cambiando el nombre del proyecto conocido anteriormente como HAWK30.	(SoftBank Corp., 2024)
<b>PHASA-35</b> BAE Systems and Prismatic	2018 - Vigente	Fue diseñado para varios servicios incluyendo los de 5G. Capacidad de 15 kg de carga útil permaneciendo hasta 1 año de vuelo continuo. Puede mantener un rango de 17-21 km de altitud con capacidad de potencia de 300-1000 W y cubriendo un radio de 200 km.	(BAE Systems, 2024)

**Tabla B - 1** Comparación entre HAPs y LAPs, mostrando características, clasificación, prestaciones y especificaciones típicas junto con los retos y oportunidades de la integración 5G/6G (Qiu et al., 2019).

Plataformas	Características	Clasificación	Prestaciones y especificaciones típicas					Retos y oportunidades de la integración en 5G/6G	
			Capacidades de carga útil	Movilidad y mantenimiento	Fuente de energía y resistencia	Velocidad y capacidad de datos	Potencia Tx		Aplicaciones
HAP	Las HAP son plataformas no tripuladas de larga duración situadas a altitudes estratosféricas que pueden levantar cargas útiles para comunicaciones polivalentes en zonas regionales de cobertura.	Aerostático	<500kg/<5~6kW	Quasi-estacionario (sólo hay que compensar los vientos)	Células solares (+células de combustible), 1~varios años				
		Aerodino	<150 kg/<500 W	Suelen volar en un círculo cerrado (unos 2 km de radio o más)	Celdas solares (+células de combustible), 1~3 meses	Alta, la capacidad puede mejorarse aumentando el número y cambiando el tamaño de los haces puntuales	1~5 W por célula	Retransmisión y radiodifusión de área extensa, control medioambiental, vigilancia marítima, observación de la Tierra, conectividad a Internet	- Ventajas: Cobertura más amplia y mayor resistencia; gran capacidad de carga útil; aumento de la capacidad gracias al redimensionamiento de los haces puntuales; espectro bajo licencia
		Globo libre	<100 kg/<100 W	La mayoría son estacionarios (Google Loon puede moverse con la velocidad del viento)	Pilas de combustible (+celdas solares), 1~3 meses				

**Tabla B - 2** Comparación entre HAPs y LAPs, mostrando características, clasificación, prestaciones y especificaciones típicas junto con los retos y oportunidades de la integración 5G/6G (Qiu et al., 2019).

LAP	Las LAP suelen referirse a pequeños aviones no tripulados con combustible, con misiones de corta duración y que operan a altitudes generalmente modestas o bajas.	Ala fija	Carga útil pesada, generalmente hasta 100 kg	Alta velocidad, velocidad máxima con 120 km/h, debe mantener un movimiento continuo hacia delante para permanecer en el aire	Pilas de combustible (+células solares), hasta decenas de horas, será más largo con energía solar	Relativamente bajo, limitado por el tamaño de la plataforma	0,1~5 W en general	Comunicación de emergencia, vigilancia militar, nodos de retransmisión en caché, inspección aérea, apoyo a acontecimientos temporales	-Ventajas: Rentable, ligero y de despliegue más rápido; enlaces de comunicación de corto alcance en la línea de visión (LoS), más cerca de los objetivos de la misión; buena conectividad inalámbrica - Contras: carga útil y resistencia baja; tiempo de vuelo limitado
		Ala rotatoria (helicóptero)	Bajo, depende del tamaño, generalmente 30~50 kg	Velocidad media, 15~40 km/h, puede permanecer inmóvil en el aire	Funciona con pilas, hasta varias horas, será más tiempo si está atado al suelo				
		Ala rotatoria (multicóptero)	Bajo, depende del tamaño, generalmente 10~15 kg	Movilidad limitada, son capaces de moverse en cualquier dirección, como permanecer inmóviles en el aire.	Funciona con pilas, hasta varias horas, será más tiempo si está atado al suelo				



**Figura C - 1** Traslape de frecuencias asignadas por el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias, Conferencia Mundial de Radicomunicaciones-23 y Release 18 (ETSI, 2024b; IFT, 2024; Oficina de Radiocomunicaciones del UIT, 2023).

**Tabla D - 1** Identificadores de Calidad de la Quinta Generación (ETSI, 2024b).

5QI Value	Resource Type	Default Priority Level	Packet Delay Budget	Packet Error Rate	Default Maximum Data Burst Volume	Default Averaging Window	Example Services
1	GBR (guaranteed flow bit rate)	20	100 ms	$10^{-2}$	N/A	2000 ms	Conversational Voice
2		40	150 ms	$10^{-3}$	N/A	2000 ms	Conversational Video (Live Streaming)
3		30	50 ms	$10^{-3}$	N/A	2000 ms	Real Time Gaming, V2X messages (TS 23.287). Electricity distribution – medium voltage, Proc automation monitoring
4		50	300 ms	$10^{-6}$	N/A	2000 ms	Non-conversational Video (Buffered Streaming)
65		7	75 ms	$10^{-2}$	N/A	2000 ms	Mission Critical user plane Push to Talk voice (e.g. MCPTT)
66		20	100 ms	$10^{-2}$	N/A	2000 ms	Non-Mission Critical user plane Push to Talk Voice
67		15	100 ms	$10^{-3}$	N/A	2000 ms	Mission Critical Video user plane
75		25	50 ms	$10^{-2}$	N/A	2000 ms	V2X messages (see TS 23.287). A2X messages (23.256)
71		56	150 ms	$10^{-6}$	N/A	2000 ms	"Live" Uplink Streaming (TS 26.238)
72		56	300 ms	$10^{-4}$	N/A	2000 ms	"Live" Uplink Streaming (TS 26.238)
73		56	300 ms	$10^{-8}$	N/A	2000 ms	"Live" Uplink Streaming (TS 26.238)
74		56	500 ms	$10^{-8}$	N/A	2000 ms	"Live" Uplink Streaming (TS 26.238)
76		56	500 ms	$10^{-4}$	N/A	2000 ms	"Live" Uplink Streaming (TS 26.238)
5	Non-GBR	10	100 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	IMS Signalling (SIP)
6		60	300 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Video (Buffered Streaming) TCP-based (e.g. www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.), AI/ML model download for image recognition (e.g. for model topology (TS 22.261)
7		70	100 ms	$10^{-3}$	N/A	N/A	Voice, Video (Live Streaming) Interactive Gaming, AI/ML model download for image recognition (e.g. for model weight factors) (TS 22.261)
8		80	90	$10^{-6}$	N/A	N/A	Video (Buffered Streaming) TCP-based (e.g. www, e-mail, chat, FTP, p2p file sharing, progressive video etc.)
9							
10	90	1100 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Video (Buffered Streaming) TCP-based (e.g. www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.) and any service that can be used over satellite access type with these characteristics (TS 38.300)	

**Tabla D - 2** Identificadores de Calidad de la Quinta Generación (ETSI, 2024b).

5QI Value	Resource Type	Default Priority Level	Packet Delay Budget	Packet Error Rate	Default Maximum Data Burst Volume	Default Averaging Window	Example Services
69		5	60 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Mission Critical Delay Sensitive Signalling (e.g. NPTT Signalling)
70		55	200 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Mission Critical Data (e.g. example services are same as 5QI 6/8/9)
79		65	50 ms	$10^{-2}$	N/A	N/A	V2X messages (TS 23.287)
80		68	10 ms	$10^{-6}$	N/A	N/A	Low Latency eMBB applications Augmented Reality
82	Delay Critical GBR	19	10 ms	$10^{-4}$	255 bytes	2000 ms	Discrete Automation (TS 22.261)
83		22	10 ms	$10^{-4}$	1354 bytes	2000 ms	Discrete Automation (TS 22.261); V2X messages (UE - RSU Platooning, Advanced Driving: Cooperative Lane Change with low LoA. (TS 22.186, TS 23.287)
84		24	30 ms	$10^{-5}$	1354 bytes	2000 ms	Intelligent transport systems (TS 22.261)
85		21	5 ms	$10^{-5}$	255 bytes	2000 ms	Electricity Distribution- high voltage (TS 22.261) V2X messages (Remote Driving. (TS 22.186, TS 23.287). Split AI/ML inference - DL Split AI/ML image recognition, (TS 22.261)
86		18	5 ms	$10^{-4}$	1354 bytes	2000 ms	V2X messages (Advanced Driving: Collision Avoidance, Platooning with high LoA. (TS 22.186, TS 23.287)
87		25	5 ms	$10^{-3}$	500 bytes	2000 ms	Interactive Service - Motion tracking data, (TS 22.261)
88		25	10 ms	$10^{-3}$	1125 bytes	2000 ms	Interactive Service - Motion tracking data, (TS 22.261), split AI/ML inference - UL Split AI/ML image recognition, (TS 22.261)
89		25	15 ms	$10^{-4}$	17000 bytes	2000 ms	Visual content for cloud/edge/split rendering (TS 22.261)
90		25	20 ms	$10^{-4}$	63000 bytes	2000 ms	Visual content for cloud/edge/split rendering (TS 22.261)

Pérdidas/Enlaces	UL1	UL2	UL3	UL4	DL1	DL2	DL3	DL4	BH1	BH2	BH3	BH4	IPL1	IPL2
Tasa de Lluvia	Mejor	Peor	Mejor	Peor	Mejor	Peor	Mejor	Peor	Mejor	Peor	Mejor	Peor	Mejor	Peor
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.07	0.01	0.04	0.32	0.95	0.32	0.95	0.00	0.00
10	0.02	0.06	0.02	0.07	0.05	0.14	0.02	0.07	0.80	2.34	0.80	2.34	0.00	0.00
25	0.04	0.13	0.05	0.16	0.12	0.34	0.06	0.17	2.64	7.73	2.64	7.73	0.00	0.00
30	0.05	0.15	0.06	0.18	0.14	0.40	0.07	0.20	3.35	9.81	3.35	9.81	0.00	0.00
65	0.11	0.31	0.13	0.38	0.30	0.86	0.15	0.42	9.17	26.85	9.17	26.85	0.00	0.00
95	0.15	0.45	0.19	0.54	0.43	1.25	0.21	0.60	15.03	44.02	15.03	44.02	0.00	0.00
185	0.29	0.83	0.35	1.01	0.83	2.40	0.39	1.13	35.81	104.88	35.81	104.88	0.00	0.00
Atmosféricas Miscelaneas	0.80	2.34	0.00	0.04	0.80	2.34	0.00	2.34	1.40	4.09	1.40	4.09	16.24	32.49
Por Borde de Cobertura	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	0.00
FSPL	123.26	132.58	62.26	97.91	126.70	136.02	62.62	98.27	134.42	143.74	134.42	143.74	154.25	160.27

Figura E - 1 Resultados de pérdidas de enlaces independientes.

Modulació	Tasa de Lluvia	UL1	UL2	UL3	UL4	DL1	DL2	DL3	DL4	BH1a	BH2a	BH3a	BH4a	IPL1	IPL2	BH1b	BH2b	BH3b	BH4b
QPSK	0	51.84	36.99	113.64	73.95	60.40	45.54	123.28	81.29	47.14	31.12	77.22	61.21	34.51	12.25	45.14	29.12	71.22	55.21
	5	51.83	36.96	113.63	73.92	60.37	45.47	123.27	81.26	46.81	30.17	76.90	60.26	34.51	12.25	44.81	28.17	70.90	54.26
	10	51.83	36.93	113.62	73.89	60.35	45.40	123.26	81.22	46.34	28.78	76.42	58.86	34.51	12.25	44.34	26.78	70.42	52.86
	25	51.80	36.86	113.59	73.80	60.28	45.20	123.22	81.12	44.50	23.39	74.58	53.47	34.51	12.25	42.50	21.39	68.58	47.47
	30	51.79	36.83	113.58	73.77	60.26	45.13	123.21	81.09	43.79	21.32	73.87	51.40	34.51	12.25	41.79	19.32	67.87	45.40
	65	51.74	36.67	113.51	73.57	60.10	44.68	123.14	80.87	37.97	4.27	68.05	34.35	34.51	12.25	35.97	2.27	62.05	28.35
	95	51.69	36.54	113.46	73.41	59.97	44.29	123.08	80.69	32.11	-12.90	62.19	17.19	34.51	12.25	30.11	-14.90	56.19	11.19
	185	51.56	36.15	113.30	72.94	59.57	43.14	122.89	80.16	11.33	-73.76	41.41	-43.67	34.51	12.25	9.33	-75.76	35.41	-49.67
16QAM	0	54.85	40.00	116.65	73.95	63.41	48.55	126.29	84.30	50.15	34.14	80.23	64.22	37.52	15.26	48.15	32.14	74.23	58.22
	5	54.84	39.97	116.64	73.92	63.38	48.48	126.28	84.27	49.82	33.18	79.91	63.27	37.52	15.26	47.82	31.18	73.91	57.27
	10	54.84	39.94	116.63	73.89	63.36	48.41	126.27	84.23	49.35	31.79	79.43	61.87	37.52	15.26	47.35	29.79	73.43	55.87
	25	54.81	39.87	116.60	73.80	63.29	48.21	126.23	84.13	47.51	26.40	77.59	56.48	37.52	15.26	45.51	24.40	71.59	50.48
	30	54.80	39.84	116.59	73.77	63.27	48.14	126.22	84.10	46.80	24.33	76.88	54.41	37.52	15.26	44.80	22.33	70.88	48.41
	65	54.75	39.68	116.52	73.57	63.11	47.69	126.15	83.88	40.98	7.28	71.06	37.37	37.52	15.26	38.98	5.28	65.06	31.37
	95	54.70	39.55	116.47	73.41	62.98	47.30	126.09	83.70	35.12	-9.89	65.20	20.20	37.52	15.26	33.12	-11.89	59.20	14.20
	185	54.57	39.17	116.31	72.94	62.58	46.15	125.90	83.17	14.34	-70.75	44.42	-40.66	37.52	15.26	12.34	-72.75	38.42	-46.66
64QAM	0	56.62	41.76	118.42	78.73	65.17	50.31	128.05	86.07	51.91	35.90	81.99	65.98	39.28	17.02	49.91	33.90	75.99	59.98
	5	56.61	41.73	118.40	78.69	65.14	50.24	128.04	86.03	51.58	34.95	81.67	65.03	39.28	17.02	49.58	32.95	75.67	59.03
	10	56.60	41.70	118.39	78.66	65.12	50.17	128.03	85.99	51.11	33.55	81.19	63.63	39.28	17.02	49.11	31.55	75.19	57.63
	25	56.57	41.63	118.36	78.57	65.05	49.97	128.00	85.89	49.27	28.16	79.35	58.24	39.28	17.02	47.27	26.16	73.35	52.24
	30	56.56	41.60	118.35	78.54	65.03	49.91	127.98	85.86	48.56	26.09	78.64	56.17	39.28	17.02	46.56	24.09	72.64	50.17
	65	56.51	41.44	118.28	78.35	64.87	49.45	127.91	85.64	42.74	9.04	72.82	39.13	39.28	17.02	40.74	7.04	66.82	33.13
	95	56.46	41.31	118.23	78.18	64.74	49.06	127.85	85.46	36.88	-8.13	66.96	21.96	39.28	17.02	34.88	-10.13	60.96	15.96
	185	56.33	40.93	118.07	77.71	64.34	47.91	127.67	84.94	16.10	-68.99	46.19	-38.90	39.28	17.02	14.10	-70.99	40.19	-44.90
256QAM	0	57.86	43.01	119.66	79.98	66.42	51.56	129.30	87.32	53.16	37.15	83.24	67.23	40.53	18.27	51.16	35.15	77.24	61.23
	5	57.85	42.98	119.65	79.94	66.39	51.49	129.29	87.28	52.83	36.19	82.92	66.28	40.53	18.27	50.83	34.19	76.92	60.28
	10	57.85	42.95	119.64	79.91	66.37	51.42	129.28	87.24	52.36	34.80	82.44	64.88	40.53	18.27	50.36	32.80	76.44	58.88
	25	57.82	42.88	119.61	79.82	66.30	51.22	129.24	87.14	50.52	29.41	80.60	59.49	40.53	18.27	48.52	27.41	74.60	53.49
	30	57.81	42.85	119.60	79.79	66.28	51.15	129.23	87.11	49.81	27.34	79.89	57.42	40.53	18.27	47.81	25.34	73.89	51.42
	65	57.76	42.69	119.53	79.59	66.12	50.70	129.16	86.89	43.99	10.29	74.07	40.38	40.53	18.27	41.99	8.29	68.07	34.38
	95	57.71	42.56	119.48	79.43	65.99	50.31	129.10	86.71	38.13	-6.88	68.21	23.21	40.53	18.27	36.13	-8.88	62.21	17.21
	185	57.58	42.18	119.32	78.96	65.59	49.16	128.91	86.19	17.35	-67.74	47.44	-37.65	40.53	18.27	15.35	-69.74	41.44	-43.65

Figura F - 1 Resultados de presupuesto de enlaces independientes.

**Tabla G - 1** Posibles aplicaciones soportadas por HAPS para 5G y 6G.

Aplicación / Servicio	Tecnología	Requisitos de QoS	Características de la red HAPS	Posible uso	Referencia
IoTm (Internet de las cosas masivo)	5G, 6G	Baja latencia, alta densidad de dispositivos, consumo de energía bajo	Conectividad en área extensa, transmisión de baja velocidad	Agricultura inteligente, monitoreo ambiental	(Agiwal et al., 2016) (Zhao et al., 2020)
Conectividad verdadera global a Internet	5G	Alta capacidad, baja latencia, alta disponibilidad	Constelaciones de HAPs y LAPs, enlaces con banda ancha integradas con redes terrestres y satelitales	Conectividad en áreas rurales, suburbanas y áreas remotas	(Rajatheva et al., 2020) (Sun & Giambene, 2024)
Vehículos autónomos y transporte inteligente	5G, 6G	Ultra baja latencia, alta confiabilidad	Comunicación constante y global a través de redes interoperables	Conducción autónoma en áreas sin cobertura terrestre	(Giuliano, 2024)
Monitoreo y gestión de drones	5G, 6G	Alta confiabilidad, cobertura amplia	Cobertura extendida en áreas sin acceso terrestre	Vigilancia y reconocimiento, entregas autónomas	(Zhao et al., 2020)
Aplicaciones industriales	5G, 6G	Alta velocidad, alta confiabilidad	HAPS con baja latencia y alta precisión en el envío de datos	IoT para fabricas inteligentes (monitoreo y control remoto)	(Zhao et al., 2020)
Comunicaciones de emergencia	5G, 6G	Alta confiabilidad, baja latencia, prioridad de servicio	Redes HAPS resilientes, acceso remoto incluso en desastres naturales	Respuesta ante desastres, cobertura en áreas sin infraestructura.	(Kumar et al., 2024)

**Hipervínculos A** Repositorio de biblioteca CICESE.

<https://repositoriobiblioteca.cicese.mx/jspui/handle/123456789/47>