

Dimensionamiento del segmento terrestre para constelaciones no geoestacionarias



Blanca Bermúdez Ramón de Fata

Máster en Ingeniería de
Telecomunicación

Sistemas de Telecomunicación

Tutor/a de TF

Víctor Monzón Baeza

**Profesor/a responsable de la
asignatura**

Carlos Monzo Sánchez

01/2024

Universitat Oberta
de Catalunya



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative
Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Ficha del Trabajo Final

Título del trabajo:	Dimensionamiento del segmento terrestre para constelaciones no geoestacionarias
Nombre del autor/a:	Blanca Bermúdez Ramón de Fata
Nombre del Tutor/a de TF:	Víctor Monzón Baeza
Nombre del/de la PRA:	Carlos Monzo Sánchez
Fecha de entrega:	01/2024
Titulación o programa:	Máster en Ingeniería de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Sistemas de Telecomunicación
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave	Satélite, NGSO, LEO, MEO, constelaciones, gateway, estación terrestre, dimensionamiento.
Resumen del Trabajo	
<p>En los últimos años, las comunicaciones por satélite han surgido como una posible alternativa frente a los sistemas de comunicaciones terrestres para garantizar el acceso a Internet de alta velocidad y a las comunicaciones de banda ancha incluso en las áreas más remotas. En concreto, los sistemas de comunicaciones basados en satélites de órbitas relativamente bajas, ya que presentan ventajas en comparación con los satélites geoestacionarios en términos de menor latencia y mayor capacidad.</p> <p>Sin embargo, para asegurar el suministro de cobertura global mediante satélites LEO es necesario desplegar un mayor número de satélites, formando así constelaciones.</p> <p>Estas constelaciones implican la necesidad de desplegar un mayor número de estaciones terrenas, también conocidas como gateways, que se comportan como enlaces entre los satélites y las redes terrestres.</p>	

La ubicación de estas estaciones desempeña un papel fundamental en los sistemas de comunicación por satélite, puesto que para asegurar la cobertura es necesario mantener la visibilidad con los satélites, los cuales se encuentran en continuo movimiento. Es por ello que determinar la ubicación de una estación terrestre se ha convertido en un reto.

En este proyecto, se va a realizar un estudio y análisis de los sistemas de comunicaciones basados en satélites LEO. Además, se va a realizar una revisión de la literatura existente acerca de las técnicas de dimensionamiento terrestre más vanguardistas utilizadas para realizar el diseño y despliegue del segmento terrestre de sistemas de comunicaciones por satélite.

Por último, se implementará un código en Matlab que permita dimensionar el segmento terrestre combinando una serie de criterios específicos, con el fin de seleccionar las mejores ubicaciones para desplegar una estación terrestre y se desarrollarán las conclusiones de este Trabajo.

Abstract

In recent years, satellite communications have emerged as a possible alternative to terrestrial communications systems to ensure access to high-speed Internet and broadband communications even in the most remote areas. In particular, communications systems based on satellites in relatively low orbits, as they have advantages compared to geostationary satellites in terms of lower latency and higher capacity.

However, to ensure the provision of global coverage by LEO satellites, it is necessary to deploy a larger number of satellites, which form constellations.

These constellations imply the need to deploy a larger number of earth stations, also known as gateways, which act as links between satellites and terrestrial networks.

The location of these stations plays a fundamental role in satellite communication systems, since in order to ensure coverage, it is necessary to preserve visibility with the satellites, which are in constant rotation. Therefore,

determining the location of a ground station has become a challenge.

In this project, a study and analysis of communications systems based on LEO satellites will be carried out. In addition, a review of the existing bibliography on the most advanced ground dimensioning techniques used for the design and deployment of the ground segment of satellite communications systems will be carried out.

Finally, a Matlab code will be implemented to size the ground segment by combining a series of specific criteria in order to select the best locations to deploy a ground station and the conclusions of this work will be developed.

Índice

1.	Introducción	2
1.1	Contexto y justificación del Trabajo	2
1.2	Objetivos del Trabajo	4
1.3	Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	4
1.4	Enfoque y método seguido	5
1.5	Planificación del trabajo	6
1.6	Breve sumario de productos obtenidos.....	8
1.7	Breve descripción de otros capítulos de la memoria	8
2.	Estado del arte	10
2.1	Introducción a los satélites	10
2.2	Sistemas de comunicación por satélite	11
2.3	Satélites según su órbita.....	13
2.4	Sistemas basados en satélites de órbita baja (LEO)	14
2.4.1	Grandes y pequeños LEOs.....	15
2.4.2	Bandas de frecuencia	16
2.4.3	Tecnologías de Satélites LEO	17
2.5	Estaciones Terrestres	18
2.5.1	Tipos de estaciones terrestres	20
2.5.2	Tecnologías usadas en estaciones terrestres	22
2.5.3	Industria de las estaciones terrestres	23
3.	Criterios y algoritmos para optimización de la ubicación de una estación terrestre	26
3.1	Criterios	26
3.1.1	Atenuación por lluvia.....	26
3.1.2	Visibilidad	27
3.1.3	Demanda de Tráfico	28
3.1.4	Ángulo de elevación.....	28
3.1.5	Disponibilidad de enlace	29
3.2	Algoritmos	30
3.2.1	Algoritmo de fuerza bruta.....	30
3.2.2	Algoritmo de optimización por enjambre de partículas	30

3.2.3	Algoritmos genéticos.....	31
3.2.4	Algoritmo de recocido simulado.....	32
4.	Estrategias de despliegue de las estaciones terrestres.....	33
4.1	Estudios basados en algoritmos de optimización.....	33
4.2	Otros estudios.....	38
4.1	Resumen y conclusión.....	43
5.	Simulaciones y resultados.....	50
5.1	Metodología.....	50
5.2	Criterios.....	51
5.3	Resultados.....	53
6.	Conclusiones y líneas futuras.....	71
6.1	Conclusiones.....	71
6.2	Líneas futuras.....	72
7.	Bibliografía.....	73

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama de Gantt. Planificación del Proyecto	7
Figura 2: Esquema simplificado de un sistema de comunicación por satélite.....	12
Figura 3: Ejemplo de comunicación entre satélites y estaciones terrestres	21
Figura 4: Descripción gráfica del ángulo de elevación	29
Figura 5: Número medio de saltos para los GW situados en mejores ubicaciones obtenidos mediante diferentes algoritmos de optimización. [4]	34
Figura 6: Ángulo de elevación de la antena vs Área de cobertura en km para diferentes altitudes [48].....	39
Figura 7: Pérdidas de propagación en espacio libre para diferentes ángulos de elevación [49].....	40
Figura 8: Modelo de mapas seguido en [52] y [53].....	42
Figura 9: Porcentaje de posiciones candidatas para el despliegue de un GW según los criterios tenidos en cuenta [53]	43
Figura 10: Metodología y lógica del programa definido en Matlab [53]	50
Figura 11: Candidatos para desplegar GS [Case-ID: 1.7: f:19.7 GHz, D:99% y elevación: 10°]	61
Figura 12: Candidatos para desplegar GS [Case-ID 1.6: f:19.7 GHz, D:99.5% y elevación: 90°]	62
Figura 13: Candidatos para desplegar GS [Case-ID: 2.7: f:30 GHz, D:99% y elevación: 10°].....	63
Figura 14: Candidatos para desplegar GS [Case-ID 2.6: f:30 GHz, D:99.5% y elevación: 90°]	64
Figura 15: Candidatos para desplegar GS [Case-ID: 3.7: f:40.5 GHz, D:99% y elevación: 10°]	65
Figura 16: Candidatos para desplegar GS [Case-ID 3.6: f:40.5 GHz, D:99.5% y elevación: 90°]	66
Figura 17: Candidatos para desplegar GS [Case-ID: 4.7: f:47.2 GHz, D:99% y elevación: 10°]	67
Figura 18: Candidatos para desplegar GS [Case-ID 4.6: f:47.2 GHz, D:99.5% y elevación: 90°]	68
Figura 19: Candidatos para desplegar GS [frecuencia 28 GHz, disponibilidad 99% y 10° de ángulo de elevación].....	69
Figura 20: Candidatos para desplegar GS [frecuencia 28 GHz, disponibilidad 99.5% y 90° de ángulo de elevación.....	70

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

En los últimos años, en un mundo totalmente globalizado, la demanda de acceso a Internet a alta velocidad y el intercambio de datos en tiempo real han aumentado de manera exponencial. Esto ha supuesto que las comunicaciones por satélite desempeñen un papel crucial en la infraestructura global de telecomunicaciones. Son fundamentales para la conectividad en áreas remotas, la comunicación en situaciones de emergencia, la expansión de la banda ancha, la exploración espacial, entre otros aspectos tecnológicos clave. Los sistemas satelitales no solo se utilizan en telecomunicaciones, sino también en aplicaciones como la observación de la Tierra, la navegación por satélite (GPS), la investigación científica, defensa, etc.

La tecnología satelital está en constante evolución. Se han desarrollado nuevas constelaciones de satélites, como es el caso de los satélites de órbita baja (LEO), que ofrecen ventajas en términos de menor latencia y mayor capacidad. Es por ello que la revolución tecnológica ha impulsado un renovado interés en los sistemas de satélites LEO. Estos satélites, que orbitan la Tierra a altitudes relativamente bajas, han emergido como una tecnología disruptiva con el potencial de transformar radicalmente la forma en que la humanidad se comunica, conecta y observa el mundo que la rodea.

Los satélites LEO han ganado un lugar destacado en la vanguardia de la innovación espacial. Su capacidad para proporcionar cobertura global, baja latencia y mayor ancho de banda en comparación con satélites situados en órbitas más altas ha generado un entusiasmo creciente tanto en la industria como en la comunidad académica.

El crecimiento exponencial de las constelaciones de satélites LEO, lideradas por empresas innovadoras como SpaceX, OneWeb y Amazon, ha desencadenado una

nueva carrera espacial que promete mejorar la vida en la Tierra y abrir nuevas fronteras en la exploración espacial. Sin embargo, este entorno también plantea desafíos significativos en términos de gestión de congestión orbital, interferencia, seguridad y sostenibilidad a largo plazo. Además, los aspectos regulatorios y políticos relacionados con el acceso al espacio y la asignación de espectro también son aspectos críticos a considerar.

Un sistema satelital está formado por el segmento espacial, fundamentalmente compuesto por el satélite, y el segmento terrestre compuesto, entre otros, por las estaciones terrestres, las antenas, equipos de transmisión y recepción, etc. Uno de los principales retos que surgen a la hora de desplegar una constelación de satélites LEO es determinar la ubicación o ubicaciones de las estaciones terrestres que permitan la comunicación a través estos satélites que orbitan cerca de la superficie terrestre a grandes velocidades.

Actualmente hay diversas propuestas para determinar la ubicación de estas estaciones, pero no hay una técnica fijada para realizar un dimensionamiento del segmento terrestre que permita obtener estos emplazamientos. Asimismo, la mayoría de propuestas tienen en cuenta un único criterio como puede ser la degradación de la señal debido a fenómenos atmosféricos, el volumen de tráfico en la zona, la visibilidad, y no una combinación de varios criterios que permita filtrar y optimizar las ubicaciones contempladas.

En este proyecto se ha realizado un análisis de las diferentes propuestas actuales con el fin de definir qué criterios son relevantes y condicionantes para decidir la ubicación de una estación terrestre. Una vez definido estos criterios, se creará un modelo en Matlab que permita dimensionar el segmento terrestre combinando los criterios elegidos y arroje como resultado posibles ubicaciones donde emplazar estaciones terrestres que permitan establecer un sistema de comunicación fiable y robusto.

1.2 Objetivos del Trabajo

La principal finalidad de este trabajo es determinar mediante la combinación de diferentes criterios el emplazamiento ideal donde situar las estaciones terrestres para constelaciones de satélites LEO con el fin de mejorar el servicio de las comunicaciones por satélite y a su vez, mejorar la interconexión con las comunicaciones terrestres y así adaptarse a los nuevos cambios y retos del segmento espacial. No obstante, se pueden definir también los siguientes objetivos:

1. Realizar un análisis y comparación de los estudios realizados hasta la fecha acerca de los principales factores que afectan a los enlaces satelitales, que criterios son los más utilizados para definir la ubicación óptima de una estación terrestre, que algoritmos de optimización se han empleado, etc.
2. Definir qué criterios son más relevantes y se deben tener en cuenta en el modelo definido a lo largo de este trabajo, por qué, y qué impacto tienen en el rendimiento de un enlace satelital.
3. Implementar en Matlab un modelo que nos permita dimensionar el segmento terrestre con el fin de obtener una lista de posibles emplazamientos óptimos para una estación terrena de comunicaciones por satélite LEO.
4. Realizar una comparación y análisis de los resultados obtenidos.
5. Determinar cómo se han obtenido los resultados, desarrollar una conclusión y establecer próximos retos y las posibles líneas de investigación que se pueden seguir.

1.3 Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

Este Trabajo puede contribuir al cumplimiento de algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, ya que las constelaciones de satélites LEO tienen un impacto significativo en sostenibilidad desde varias perspectivas.

Las constelaciones de satélites LEO pueden proporcionar conectividad a áreas remotas y rurales que de otro modo serían difíciles de conectar. Esto puede tener un impacto positivo en la inclusión digital y el desarrollo económico de estas regiones. Además, al ampliar el acceso a internet de alta velocidad en todo el mundo, estas constelaciones pueden contribuir a reducir la brecha digital, brindando oportunidades educativas y económicas a comunidades que anteriormente estaban marginadas digitalmente.

Asimismo, de acuerdo con la finalidad principal del trabajo, a la hora de realizar la búsqueda de una ubicación óptima es importante tener en cuenta criterios éticos y sociales con el fin de producir un impacto positivo en el ámbito social. De este modo, antes de decidir un emplazamiento, es importante comprobar que las ubicaciones obtenidas tras realizar el dimensionamiento terrestre deben encontrarse en una situación geo-política óptima, donde no existan conflictos bélicos, se respeten los derechos humanos y se lleven a cabo políticas cuyo fin sea el de cuidar y proteger el medioambiente.

1.4 Enfoque y método seguido

Durante el trabajo se ha realizado una labor de investigación sobre la situación actual de las constelaciones de satélites y un análisis de los estudios actuales referentes al dimensionamiento del globo terráqueo y al emplazamiento de las estaciones terrenas. Este estudio nos permitirá dar contexto al proyecto y realizar una comparación de los criterios tenidos en cuenta en cada una de las investigaciones, para así poder definir cuáles son los más interesantes para el desarrollo de nuestro modelo, de acuerdo a los objetivos planteados anteriormente. Asimismo, este análisis sobre las diferentes propuestas actuales, nos permitirá detectar las carencias existentes con el fin de tenerlas en cuenta para el dimensionamiento terrestre realizado en este trabajo.

Una vez elegidos los factores críticos se procederá a desarrollar un modelo en Matlab para la búsqueda de la localización ideal donde ubicar una ground station mediante simulaciones que permitan dimensionar el segmento terrestre. Estas simulaciones se han realizado estableciendo unos umbrales para cada factor y

descartando las ubicaciones que no cumplen las condiciones fijadas, con el fin de poder asegurar una mínima calidad del servicio. A través de la variación de estos umbrales y combinando las ubicaciones que sí cumplan todas las condiciones establecidas, se obtienen diferentes resultados que posteriormente serán analizados y comparados con el fin de desarrollar una conclusión sobre todo el trabajo realizado.

1.5 Planificación del trabajo

El Trabajo se ha desarrollado desde el inicio del semestre, fijado el 27 de septiembre de 2023, hasta la fecha de la última entrega planificada para enero de 2024.

El Trabajo de Fin de Máster consta de 5 entregas o PEC, Pruebas de Evaluación Continua, en las que progresivamente se irá redactando la memoria en paralelo al desarrollo y avance del trabajo, plasmando en este documento todo el proceso.

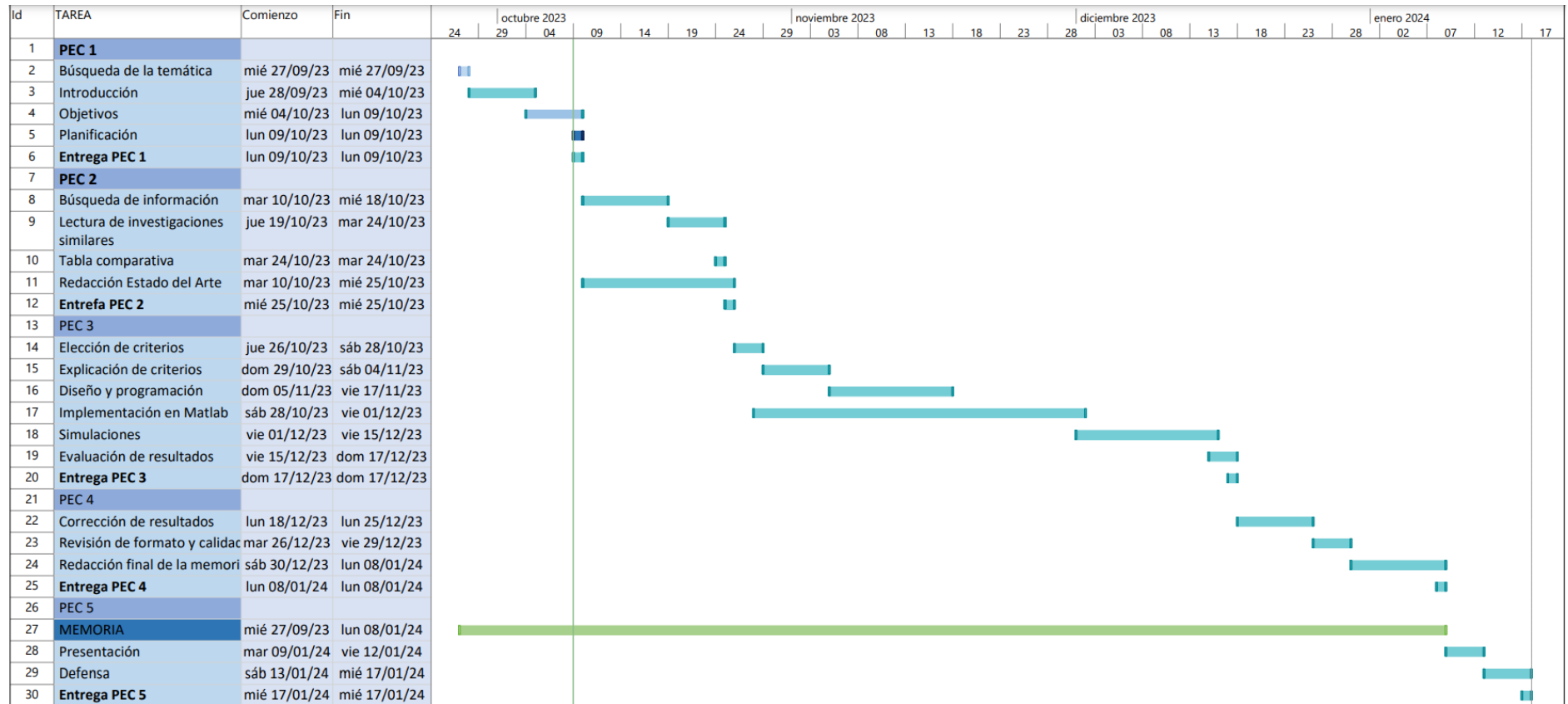


Figura 1: Diagrama de Gantt. Planificación del Proyecto

1.6 Breve resumen de productos obtenidos

Con la investigación realizada en este Trabajo Fin de Máster se espera obtener un listado de ubicaciones óptimas donde implementar una estación terrestre para constelaciones de satélites no geoestacionarios, en concreto, satélites LEO. Para la obtención de resultados, nos vamos a apoyar en el uso de Matlab, desarrollando un código que nos permita realizar iteraciones sobre el globo terráqueo comprobando si se cumplen una serie de requisitos establecidos previamente.

En caso de no llegar a una lista finita de ubicaciones, se espera obtener unas conclusiones sólidas que seguir en una línea de trabajo futuro. Para ello se realizarán variaciones de los requisitos establecidos con el fin de clarificar el grado de influencia de los criterios escogidos sobre el emplazamiento de una estación terrestre.

1.7 Breve descripción de otros capítulos de la memoria

La memoria del proyecto, que contiene todo el proceso desarrollado en este Trabajo Fin de Máster y permite seguir el orden en el que se ha ido avanzando durante estos meses, se ha estructurado de la siguiente manera:

- **Capítulo 1:** contiene una breve descripción e introducción del trabajo desarrollado. Permite obtener una visión general del proyecto clarificando los objetivos del mismo, el enfoque fijado, la planificación y aspectos importantes como el impacto ético-social.
- **Capítulo 2:** en este capítulo se realiza una breve introducción de la historia del satélite, los tipos de satélites que existen y sus diferentes usos. Se definen los componentes de un enlace satelital, las bandas de frecuencia más utilizadas, etc. Por último, se hace una introducción a las constelaciones de satélites LEO, para después adentrarse en el mundo de las estaciones terrestres.

- **Capítulo 3:** contiene una breve descripción de los criterios más utilizados en los despliegues de estaciones terrestres, así como una explicación sobre el impacto de los mismos en el rendimiento de los enlaces entre los satélites y las redes terrestres. Además, también se describen los algoritmos de optimización más relevantes, con sus ventajas y desventajas.
- **Capítulo 4:** se realiza un análisis de los estudios más relevantes acerca de técnicas de dimensionamiento terrestre y la implementación de estaciones terrenas. Por último, a modo resumen de este capítulo, se realizan dos tablas comparativas sobre el trabajo realizado para sintetizar y clarificar las conclusiones obtenidas.
- **Capítulo 5:** en él se define y describe el código implementado en Matlab basado en los criterios descritos en el capítulo 3.
- **Capítulo 5:** se exponen los resultados obtenidos tras realizar simulaciones con el código de Matlab descrito en el capítulo 4. Asimismo, se realiza un análisis de los resultados para comprobar si se han logrado los objetivos propuestos al inicio del proyecto.
- **Capítulo 6:** se desarrollan las conclusiones del Trabajo en base a los resultados obtenidos y se exponen las líneas futuras que se podrían seguir en caso de continuar investigando.
- **Capítulo 7:** contiene una lista numerada de las referencias bibliográficas utilizadas en la memoria.

2. Estado del arte

En este apartado se va a describir brevemente el marco actual de los Sistemas de Comunicación por Satélites LEO, comenzando por una breve introducción a los satélites y su historia, para continuar con la definición de los sistemas de comunicación por satélite y terminar profundizando un poco más en los sistemas LEO y en las estaciones terrestres.

2.1 Introducción a los satélites

Según la Agencia Espacial Europea (ESA) [1], un satélite se define como un objeto que órbita alrededor de un planeta. Estos satélites pueden ser naturales, como es el caso de la Luna, o artificiales, fabricados por el hombre. La Real Academia Española de la Lengua, RAE [2], define un satélite artificial como *“Vehículo tripulado o no, que se coloca en órbita alrededor de la Tierra o de otro astro, y que lleva aparatos apropiados para recoger información y transmitirla”*.

Los satélites artificiales pueden ser utilizados con fines muy diversos como fines científicos, se utilizan los satélites para observar, explorar y conocer el espacio; con fines meteorológicos, como satélites que nos permitan predecir las condiciones climatológicas; fines militares para apoyar las operaciones de los ejércitos de ciertos países o fines comunicativos como los sistemas de comunicación por satélite, que se trata de la aplicación más difundida en la actualidad y es el objeto principal de este proyecto.

El concepto de comunicación por satélite se atribuye a Arthur C. Clarke [3] que propuso la colocación de 3 satélites separados entre sí 120° en una órbita de 24 horas a 36000 km sobre la superficie Terrestre. A su vez, el ejército estadounidense realizaba por aquel entonces un estudio clasificado sobre el potencial uso comercial de los satélites de comunicaciones síncronas además de experimentos sobre el uso del espacio como medio de propagación de radiocomunicaciones utilizando la luna como reflector pasivo.

No fue hasta octubre de 1957 cuando se produjo el primer lanzamiento del satélite artificial, Sputnik 1, llevado a cabo por la URSS [4]. Este satélite llevaba a bordo un radiofaro que emitía una señal en las bandas de frecuencia de 20 y 40 MHz. Desde ese entonces las

comunicaciones por satélite han suscitado un gran interés debido a las altas capacidades y diversas aplicaciones que ofrece.

Los primeros satélites de comunicaciones estaban diseñados para reflejar las señales que se emitían desde las estaciones terrestres, y no para transmitir señales de radio [5]. Es decir, funcionaban de forma pasiva y no activa. Las señales reflejadas se emitían en todas las direcciones con el fin de que pudieran ser captadas desde cualquier lugar del planeta.

Actualmente, los satélites se utilizan como sistemas activos que reciben señales desde las estaciones terrestres, las amplifican y retransmiten gracias a los sistemas de recepción y transmisión que llevan a bordo.

Inicialmente, los satélites eran de grandes dimensiones y generaban grandes cantidades de potencia, como es el caso de INTELSAT-1, que fue lanzado al espacio en 1965 y estuvo operativo hasta 1969. Esto suponía altos tiempos de desarrollo y grandes costes. Además, un único fallo en órbita suponía un gran coste. Por esta razón, creció el interés y la presencia de los pequeños satélites que pueden llegar a tener las mismas prestaciones que los grandes satélites gracias a los avances en microelectrónica, especialmente en microprocesadores, con la ventaja de que precisan tiempos de desarrollo menores y requieren un presupuesto más ajustado.

2.2 Sistemas de comunicación por satélite

Un sistema de comunicación por satélite [6] está compuesto por el segmento espacial, el centro de control conocido como TT&C (Telemetría, Telemando y Control) y el segmento terrestre que consta de las estaciones terrenas transmisoras y receptoras y las redes terrestres. Se puede observar la estructura simplificada de un sistema de comunicación por satélite en la Figura 2:

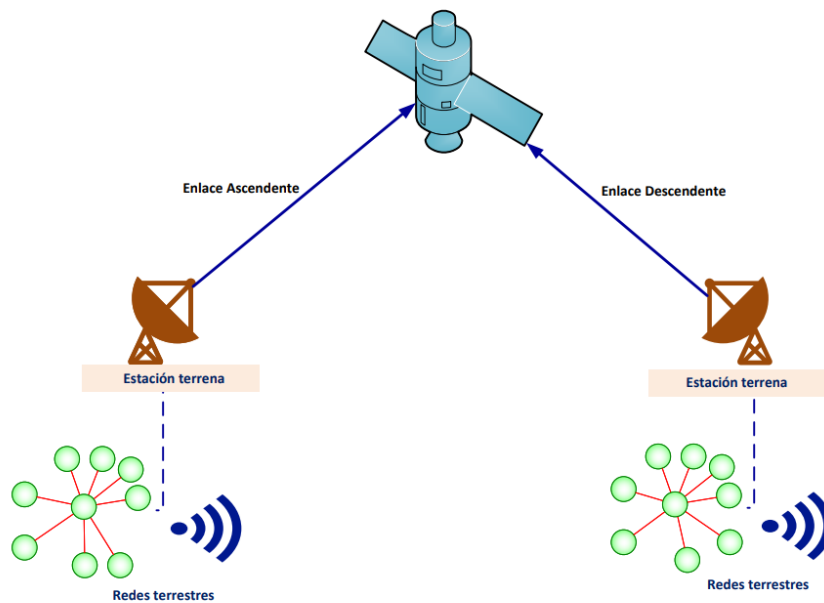


Figura 2: Esquema simplificado de un sistema de comunicación por satélite

El satélite compone la pieza fundamental del sistema, y su función es la de crear enlaces que permitan establecer comunicación entre diferentes puntos que estén contemplados dentro del rango de cobertura del mismo [7]. Se trata de una estación repetidora que se encarga de recibir, amplificar, cambiar de banda y retransmitir la señal radioeléctrica estableciendo conexión con las estaciones terrenas contempladas en su zona de cobertura.

Las estaciones terrestres son otra parte fundamental de estos sistemas ya que son las encargadas de transmitir las señales hasta el satélite y recibir las señales procedentes del mismo. Asimismo, también son los enlaces entre las comunicaciones por satélites y las comunicaciones terrestres. Es común utilizar potencias elevadas y antenas de gran directividad para la transmisión de señales, mientras que en recepción se suelen utilizar antenas de gran directividad con un bajo factor de ruido.

El centro de control es el encargado de realizar el control y mando del satélite de manera remota desde la tierra. Algunas de sus funciones son el control orbital, el envío de telecomandos, monitorización y localización del satélite, cálculo de órbitas, realización de pruebas, gestión de la capacidad de los mismos, planificación y ejecución de operaciones, y resolución de incidencias. [8]

El enlace ascendente es aquel en el que las señales viajan desde la estación terrena hasta el satélite, mientras que en el enlace descendente las señales viajan en sentido contrario, desde el satélite hasta la estación terrena. Ambos forman un conjunto de enlaces que son los encargados de establecer la comunicación.

Además de otros enlaces que no se nombran, existen otros dos tipos de enlace en especial que no aparecen en la Figura 1, que son los enlaces inter-satelitales y los enlaces de alimentación. En capítulos siguientes se detalla el concepto de ambos enlaces.

2.3 Satélites según su órbita

Cuando se habla de la capacidad de los satélites para operar en diversas órbitas alrededor de la Tierra, se hace referencia a que su trayectoria está determinada por la fuerza que ejerce la gravedad sobre los mismos en función de su distancia. La órbita en la que se encuentra un satélite es crucial para el correcto funcionamiento del mismo. Existen varios factores que influyen en la elección de la órbita ideal para un satélite, como su propósito de uso y su diseño.

Los satélites se pueden clasificar según sus órbitas en [8]:

- Satélites GEO, geostacionarios: estos satélites orbitan a la misma velocidad que la velocidad de rotación de la Tierra y, por tanto, se encuentran fijos sobre un mismo punto del globo terráqueo. Para ello, estos satélites se sitúan en órbitas circulares ecuatoriales a una altitud de 35800 km aproximadamente. Sus principales usos son la transmisión de datos a larga distancia, como es la televisión y la telefonía, y la recopilación y envío de datos meteorológicos. Con 3 satélites se podría proporcionar cobertura al 95% de la superficie terrestre.
- Satélites HEO, de órbita muy elíptica: estos satélites siguen una órbita elíptica, y no circular como los anteriores, lo que supone que la distancia a la Tierra difiere dependiendo del punto de su órbita en el que se encuentre el satélite. Son empleados para cartografiar la superficie terrestre.
- Satélites MEO, de órbitas medias: estos satélites se sitúan a una altitud media de 10.000 km, aunque puede variar desde 9.600 km hasta 14.5000 km. Esto supone que

tardan una media de 6 horas en dar una vuelta a la Tierra con una visibilidad de 2 horas. Su principal uso, al igual que los satélites GEO es el de telefonía y televisión, aunque también se destinan para fines científicos. Para dar cobertura a todo el globo terrestre se necesitan entre 10 y 15 satélites.

- Satélites LEO, de órbita baja: son satélites que orbitan la Tierra a una altitud de menos de 2.000 km y poseen un período inferior a 128 minutos. Se utilizan principalmente para comunicaciones y para recopilar información geológica. Son necesarios al menos 40 satélites para proporcionar una cobertura total.

2.4 Sistemas basados en satélites de órbita baja (LEO)

Los satélites en órbita terrestre baja (LEO, por sus siglas en inglés) han revolucionado la forma en que observamos y estudiamos nuestro planeta. Estos satélites, que orbitan la Tierra a altitudes relativamente bajas, han demostrado ser herramientas valiosas en una amplia gama de aplicaciones, desde la observación del clima y el medio ambiente hasta la comunicación y la navegación.

Los satélites LEO se encuentran en órbitas que varían desde unos pocos cientos de kilómetros hasta aproximadamente 2,000 kilómetros de altitud sobre la superficie de la Tierra. Esto los sitúa mucho más cerca de la Tierra en comparación con otros tipos de órbitas, como las órbitas geoestacionarias, lo que presenta ventajas significativas en términos de menor latencia y mayor capacidad de reutilización del espectro radioeléctrico. Otra ventaja es que los terminales que se utilizan en las comunicaciones por satélites LEO no requieren grandes potencias de transmisión.

Un grupo de satélites LEO es conocido como constelación. En las constelaciones de satélites, cuando se pierde visibilidad con un satélite porque ha desaparecido del ángulo de visión las comunicaciones se transfieren a otro satélite que entra en el rango de visión. En una conexión prolongada en el tiempo, este proceso puede ocurrir varias veces.

Un sistema LEO está compuesto por una constelación de satélites que trabajan de manera conjunta como una única red en la que cada satélite actúa como un switch. Los satélites se

conectan a otros satélites próximos a ellos mediante enlaces intersatelitales. A su vez, los satélites se comunican con las estaciones terrestres, GS, a través de los enlaces gateway, GWL de sus siglas en inglés Gateway link.

2.4.1 Grandes y pequeños LEOs

En la Conferencia Mundial Administrativa de Radio de 1992 (WARC-92), celebrada en España, se estableció que los sistemas LEO se pueden clasificar en pequeños LEO y grandes LEO [8].

Pequeños LEO

Los pequeños LEO son una clase de pequeños satélites de bajo coste comprendidos entre los 50 y 100 kilogramos. Se sitúan en las bandas de 137-138 MHz y 400,15-401 MHz para los enlaces descendentes (satélite-Estación terrestre) y 148-149,9 MHz para enlaces ascendentes (Estación terrestre-satélite).

Estas bandas han sido usadas hasta ahora para llevar a cabo investigaciones espaciales, servicios fijos y móviles y para satélites meteorológicos. Actualmente comparten uso con los pequeños LEO destinados a usos como, por ejemplo, las comunicaciones de datos o servicios de mensajería. Sin embargo, los pequeños LEO no están destinados para los servicios de voz.

Estos sistemas son más baratos que los grandes LEO.

Grandes LEO

Los sistemas de grandes LEOs están compuestos por satélites de entre 350 y 500 kilogramos cuyo propósito son las comunicaciones de voz y datos en tiempo real.

Los grandes LEO pueden transportar servicios de voz y datos de alta velocidad, a diferencia de los pequeños LEO. Además, los grandes LEO utilizarán a futuro nuevas tecnologías, aún no probadas, en cuanto a procesamiento a bordo y enlaces troncales entre satélites a

frecuencias milimétricas (30 GHz), lo que los convierte en una tecnología mucho más arriesgada.

2.4.2 Bandas de frecuencia

La asignación de bandas de frecuencia para los satélites LEO está regulada por organismos internacionales, como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), para evitar interferencias y garantizar un uso eficiente del espectro radioeléctrico. Las bandas de frecuencia utilizadas por los satélites LEO varían dependiendo del propósito y la aplicación del satélite. Algunas de las bandas de frecuencia más comunes [9] [10] [11] utilizadas por los satélites LEO son:

- Banda L (1-2 GHz): Esta banda se utiliza comúnmente para aplicaciones de comunicaciones satelitales, como servicios de telefonía móvil, transmisión de datos y acceso a internet. Los satélites LEO que ofrecen servicios de internet de alta velocidad, como las constelaciones de OneWeb, utilizan la banda L para proporcionar conectividad global.
- Banda S (2-4 GHz): Esta banda también se utiliza para aplicaciones de comunicaciones satelitales, así como para aplicaciones de radar y observación de la Tierra. Los satélites LEO que se utilizan para observaciones de la Tierra, como los satélites de observación de la Tierra de la NASA y otras agencias espaciales, a menudo utilizan la banda S para capturar datos de radar y obtener imágenes de alta resolución de la superficie terrestre.
- Banda X (8-12 GHz): Esta banda se utiliza para aplicaciones de radar y comunicaciones satelitales de alta capacidad. Algunos satélites LEO de observación de la Tierra utilizan la banda X para obtener datos de radar y generar imágenes detalladas de la superficie terrestre, especialmente en regiones donde la nubosidad o la oscuridad pueden afectar la captura de imágenes ópticas.
- Banda Ka (26.5-40 GHz): Esta banda se utiliza para aplicaciones de comunicaciones satelitales de alta capacidad, como servicios de internet de alta velocidad y transmisión de datos de alta velocidad. Algunos satélites LEO de constelaciones de comunicaciones, como los satélites de la constelación de comunicaciones de banda

Ka de SpaceX, utilizan esta banda para proporcionar conectividad de alta velocidad en áreas remotas y rurales.

2.4.3 Tecnologías de Satélites LEO

En cuanto a la tecnología, los satélites LEO han evolucionado significativamente en términos de capacidad de procesamiento, almacenamiento y transmisión de datos. Esto ha permitido el desarrollo de satélites más pequeños y más eficientes, capaces de ofrecer una amplia gama de servicios.

Una de las mayores innovaciones en las comunicaciones por satélites LEO es el desarrollo de constelaciones. Empresas como SpaceX con su proyecto Starlink, OneWeb, Amazon con su proyecto Kuiper y otros, están desplegando constelaciones de cientos o incluso miles de satélites LEO para proporcionar conectividad global de internet de alta velocidad. Estos satélites se comunican entre sí y también con las estaciones terrestres para proporcionar servicios de internet a áreas remotas y desatendidas en todo el mundo.

Además, los satélites LEO utilizan antenas de alta capacidad, como antenas de matriz activa y antenas de haz electrónico, que pueden apuntar y dirigir señales de manera más precisa a áreas específicas en la Tierra. Estas antenas permiten una mayor capacidad de transmisión de datos y un mejor rendimiento de las comunicaciones.

Otro de los avances es el uso de tecnologías emergentes, como los enlaces de datos ópticos, también conocidos como enlaces láser. Estos enlaces utilizan pulsos de luz láser para transmitir datos a través del espacio con velocidades extremadamente altas, lo que permite una mayor capacidad de transmisión de datos y una menor latencia en las comunicaciones.

Las tecnologías de Radio Definida por Software (SDR, por sus siglas en inglés) permiten una mayor flexibilidad en la configuración y gestión de las comunicaciones por satélite LEO [12]. Los sistemas SDR utilizan software para controlar y gestionar la comunicación, lo que permite adaptar las capacidades de transmisión y recepción de los satélites en tiempo real,

mejorar la eficiencia del espectro y habilitar la interoperabilidad entre diferentes redes y servicios de comunicaciones.

También se han producido avances en términos de procesamiento de datos que han permitido la mejora de las capacidades de procesamiento y análisis de datos en el espacio. Esto ha llevado a la capacidad de procesar datos de observación de la Tierra en tiempo real, lo que permite una respuesta más rápida a eventos y situaciones en la superficie terrestre, y reduce la necesidad de transmitir grandes cantidades de datos a la Tierra.

Asimismo, los avances en técnicas de modulación, codificación y procesamiento de señales han mejorado la eficiencia espectral de los sistemas de comunicaciones por satélite LEO, lo que permite una mayor capacidad de transmisión de datos en un ancho de banda dado y una mejor utilización del espectro radioeléctrico.

En el campo de las telecomunicaciones, los satélites LEO permiten ofrecer acceso a Internet de alta velocidad de manera global, incluso en zonas rurales o remotas. Asimismo, permiten conectar dispositivos IoT (Internet de las cosas) en todo el mundo. Entre sus ventajas también se encuentran las altas tasas de transmisión de datos, y el corto periodo de despliegue del satélite en comparación con los satélites geoestacionarios.

2.5 Estaciones Terrestres

Las estaciones terrestres, GS de sus siglas en inglés Ground Station, son instalaciones en la superficie terrestre que se encargan de establecer enlaces de comunicación con los satélites. Son una parte fundamental de los sistemas de comunicación por satélite. Estas estaciones son responsables de recibir y transmitir señales de los satélites en órbita a los centros de control terrestres y a los usuarios finales [13].

Las estaciones terrestres están compuestas por antenas, equipos de transmisión y recepción de señales, sistemas de procesamiento de datos y enlaces de comunicación terrestres, como fibra óptica o enlaces de microondas. Estas instalaciones pueden ser de diferentes tamaños y capacidades, desde estaciones terrestres pequeñas y portátiles

utilizadas en aplicaciones móviles, hasta estaciones terrestres grandes y complejas utilizadas en redes de comunicaciones globales.

Las GS son esenciales para la operación de los sistemas de comunicaciones por satélite, ya que son responsables de establecer enlaces de comunicación bidireccionales con los satélites en órbita. Transmiten señales a los satélites para su retransmisión a otras ubicaciones en la Tierra, y reciben señales de los satélites para su procesamiento y distribución a los usuarios finales.

Las estaciones terrestres sólo pueden comunicarse con los satélites LEO cuando el satélite se encuentra en su región de visibilidad. La duración de la visibilidad y, por tanto, la duración de la comunicación varía en cada paso del satélite LEO sobre la estación terrestre, ya que los satélites LEO se mueven muy rápido sobre la Tierra [14].

Además de la transmisión y recepción de señales, las GS también pueden realizar otras funciones importantes, como el seguimiento y control de los satélites, la gestión del tráfico de comunicaciones, la monitorización del rendimiento de los enlaces de comunicación, la gestión de la seguridad y el mantenimiento de las instalaciones.

En los últimos años, se ha producido un gran avance en la tecnología de las GS de satélites LEO. En particular, se han desarrollado nuevas soluciones de antena y sistemas de procesamiento de señales que permiten una mayor eficiencia en la transmisión y recepción de señales de los satélites.

Otro aspecto importante es la capacidad de las GS para soportar múltiples constelaciones de satélites LEO. Actualmente, existen varias constelaciones operativas de satélites LEO, cada una con sus propias especificaciones técnicas y requisitos de comunicaciones. Las GS deben ser capaces de comunicarse con todas estas constelaciones y proporcionar una conectividad robusta y fiable.

2.5.1 Tipos de estaciones terrestres

Según [15], las estaciones terrestres pueden clasificarse en:

Estación Fija: este tipo de estación se ubica en un único punto específico. Es necesario realizar un estudio previo al despliegue de la misma en el que se analicen los factores que pueden afectar a la comunicación entre la estación y el satélite. Algunos de estos factores son la elevación, la topografía del emplazamiento, el clima y otras condiciones que puedan ser relevantes para el establecimiento de la estación. Dentro de las estaciones fijas, podemos encontrar:

- **Gateway:** instalación que actúa como un punto central o nodo de interconexión entre una red terrestre y una red de satélites. Es esencialmente un centro de enlace que permite la transferencia de datos y la comunicación bidireccional entre la red terrestre y los satélites en órbita. Los gateways son cruciales en sistemas de satélites, especialmente en aquellos que forman constelaciones o redes de satélites.
- **Telepuerto:** es una instalación más amplia y completa que un gateway que no solo actúa como centro de conexión entre la red terrestre y la red satelital, sino que también está especializada en recibir, procesar, almacenar y transmitir señales de comunicaciones por satélite, así como también para proporcionar distintos servicios de televisión, radio y datos a nivel global. Suelen estar formados por un conjunto de grandes antenas parabólicas, equipos de procesamiento de señales y sistemas avanzados para administrar y distribuir una amplia gama de servicios de telecomunicaciones a nivel global. Algunos ejemplos de Telepuerto en España se encuentran en Santander, Pozuelo de Alarcón o Alcázar de San Juan.

Estación Móvil: este tipo de estaciones se encuentran en movimiento y pueden comunicarse con un satélite desde diversas ubicaciones. Suelen ubicarse en medios de transporte y, además, están equipadas con componentes que facilitan su transporte. Las estaciones terrenas en movimiento (ETEM) proporcionan comunicaciones de banda ancha, incluida conectividad a Internet, en plataformas móviles. Actualmente existen tres tipos de ETEM: ETEM a bordo de aeronaves (ETEM aeronáuticas), ETEM a bordo de barcos (ETEM marítimas) y ETEM a bordo de vehículos terrestres (ETEM terrestres).

Dentro de este tipo de estaciones, existe una solución de telecomunicaciones versátil y escalable que se utiliza en áreas remotas o de difícil acceso denominada **VSAT** (Very Small Aperture Terminal, de sus siglas en inglés). Una VSAT, según [16], es una estación terrestre que se utiliza para transmitir y recibir señales de satélite. Su tamaño es muy reducido en comparación con otras estaciones terrestres, lo que significa que es portátil y fácil de instalar. El término VSAT se refiere específicamente a las antenas parabólicas utilizadas en estas redes. Las redes VSAT se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde comunicaciones comerciales hasta militares y gubernamentales.

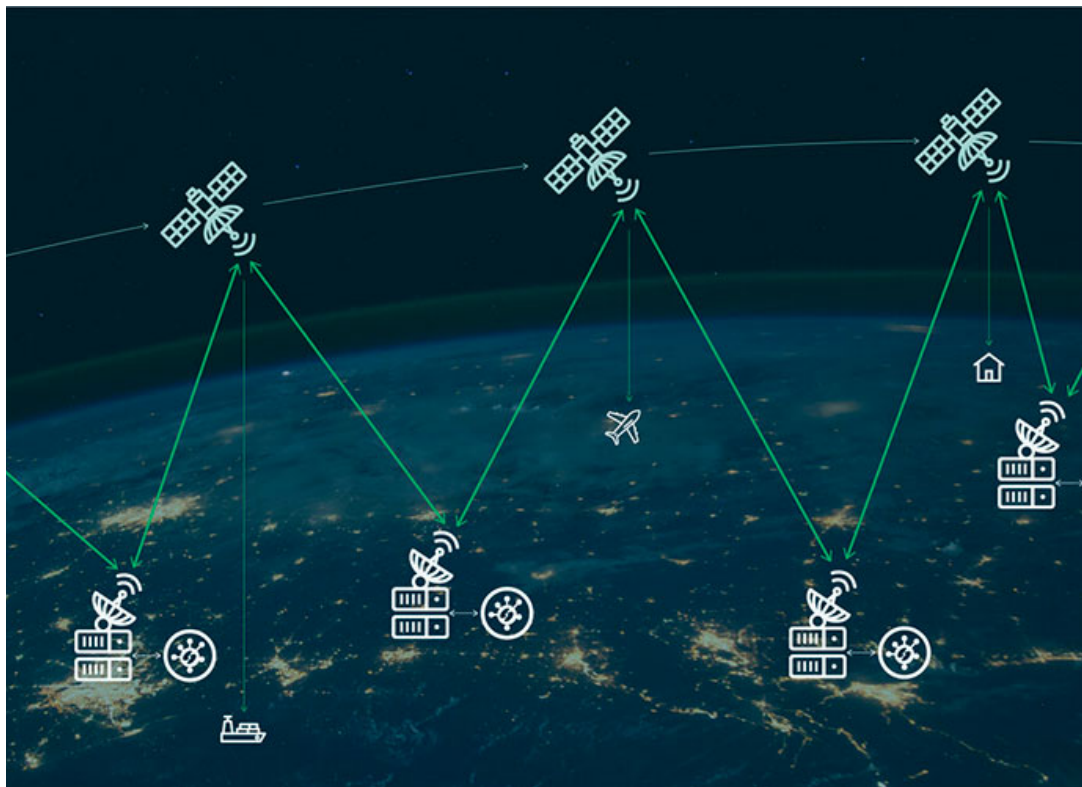


Figura 3: Ejemplo de comunicación entre satélites y estaciones terrestres

En la Figura 3, podemos observar un ejemplo de cómo los satélites se comunican con estaciones terrestres fijas, representadas por un conjunto de equipos y una antena parabólica, y también con estaciones terrestres móviles, que están representadas por aviones y barcos, como se ha explicado con anterioridad.

Además, dentro de las estaciones terrestres podemos distinguir aquellas que utilizan enlaces de radiofrecuencia (RF), es decir, se comunican con los satélites a través de ondas

electromagnéticas de radio y las estaciones ópticas que utilizan láseres para enviar señales a través del espacio libre o fibras ópticas. Ambos tipos de estaciones terrestres son fundamentales en la infraestructura de comunicaciones moderna y juegan un papel vital en la conectividad global y las redes de información.

2.5.2 Tecnologías usadas en estaciones terrestres

Las estaciones terrestres modernas suelen utilizar una variedad de tecnologías para cumplir con sus funciones de comunicación, monitoreo y procesamiento de señales. Entre estas tecnologías se incluyen:

- **Antenas:** Las estaciones terrestres utilizan antenas para recibir y transmitir señales. Pueden variar en tamaño, forma y tipo dependiendo de la aplicación. Las antenas parabólicas son las más utilizadas en estaciones terrestres. Se caracterizan por su alta ganancia direccional, y pueden ser de diferentes tamaños. También se utilizan antenas multihaz, que pueden apuntar simultáneamente a múltiples satélites aumentando la capacidad y la cobertura, y antenas phased array que permiten el control electrónico de la dirección del haz sin necesidad de mover mecánicamente toda la antena.
- **SDR (Software Defined Radio):** Es una tecnología [12] [17] que permite la recepción y transmisión de señales de radio utilizando hardware configurable mediante software. Cabe destacar que este tipo de tecnología ofrece una gran flexibilidad y capacidad de actualización al poder rediseñar en cualquier momento mediante software el procesamiento de comunicaciones empleado para transmitir y recibir la información.
- **Tecnologías de procesamiento de señales digitales (DSP):** Las estaciones terrestres suelen utilizar DSP para procesar señales de manera eficiente, permitiendo la demodulación, filtrado, corrección de errores y otras operaciones necesarias para la transmisión y recepción de datos.
- **Tecnologías de radio multibanda:** Uno de los avances más significativos en las redes de estaciones terrestres ha sido el desarrollo de radios multibanda [18]. Estas radios son capaces de comunicarse con un satélite simultáneamente en múltiples bandas de frecuencia, lo que amplía significativamente la gama de aplicaciones para

las que se pueden utilizar. Además, estas radios están diseñadas para resistir interferencias y otras condiciones ambientales.

- **Computación en la nube y redes definidas por software (SDN):** La virtualización de estaciones terrestres [19] basadas en satélites es una tecnología revolucionaria para la comunicación por satélite. Implica el uso de una infraestructura virtualizada, que permite la consolidación de múltiples estaciones terrestres en una única plataforma unificada. A través de la computación en la nube y las tecnologías avanzadas de redes definidas por software (SDN), la virtualización de estaciones terrestres basadas en satélites promete generar importantes ahorros de costos, mayor flexibilidad y mayor eficiencia operativa.
- **Inteligencia Artificial (IA) y Machine Learning (ML):** La aplicación de IA [20] a una amplia variedad de aspectos de la comunicación por satélite ha demostrado un excelente potencial, como es el caso de la prevención de interferencias, la previsión del tráfico de red, el modelado de canales, la minería de telemetría, la gestión de interferencias, la detección remota, el modelado de comportamiento, etc. Las enormes cantidades de datos generadas por los satélites de observación de la Tierra son recibidas por las estaciones terrestres, y el ML y la IA son herramientas eficaces que pueden ayudar a procesar estos datos de manera inteligente. Además, estas tecnologías también se pueden utilizar para mejorar la detección de señales, predecir problemas de red o automatizar tareas de mantenimiento y optimización para mejorar el rendimiento de las estaciones terrestres.

Estas tecnologías pueden combinarse de manera integrada en las estaciones terrestres para ofrecer una comunicación más eficiente, confiable y adaptable a las necesidades específicas de cada sistema.

2.5.3 Industria de las estaciones terrestres

La gestión y operación de estaciones terrestres pueden ser llevadas a cabo por una variedad de entidades, incluyendo gobiernos, empresas privadas y organizaciones internacionales. A continuación, se mencionan algunos de las principales entidades:

1. Agencias Espaciales Gubernamentales:

- **ESA (Agencia Espacial Europea):** La Agencia Espacial Europea [21] tiene su propia red de estaciones terrestres) para apoyar sus misiones y programas espaciales, como es el caso de la red ESTRACK, operada por el Centro Europeo de Operaciones Espaciales (ESOC). Además, la ESA tiene en propiedad otras estaciones, algunas de las cuales se encuentran en España, como las estaciones de Cebreros, Maspalomas y Villafranca, pero también hay estaciones en otros países como Suecia, Portugal, Bélgica o la Guayana Francesa entre otros.

2. Empresas de Comunicaciones por Satélite:

- **Intelsat:** es una de las mayores empresas de servicios de satélites a nivel mundial. Actualmente Intelsat [22] opera un total de ocho estaciones terrestres que forman una red y actúan como gateways entre su red satelital y su red de fibra IntelsatOne.
- **SES:** Otra empresa líder en servicios de satélites, SES [23] también opera estaciones terrestres para apoyar sus servicios de comunicaciones por satélite. Actualmente cuentan con una gran infraestructura terrestre que conecta con sus más de 70 satélites situados en diferentes órbitas.
- **Eutelsat:** Una empresa europea de satélites [24] que gestiona una red de estaciones terrestres para sus servicios de radiodifusión, datos y comunicaciones. Cuenta con una extensa red de más de 70 gateways en todo el mundo, que les permite acceder a sus satélites desde casi cualquier punto geográfico del planeta.
- **Globecast:** Está presente en Europa, América, Asia, África y Oriente Medio a través de diecinueve puntos de presencia que incluyen doce telepuertos [25] y centros de operaciones técnicas, unidos entre sí por una red de telecomunicaciones terrestres.
- **Hispasat:** se trata de una empresa española operadora de satélites de comunicaciones que ofrece cobertura en América, Europa y el Norte de África [26]. Actualmente, el segmento terrestre de Hispasat está formado por cuatro Centros de Control y otras estaciones terrenas con capacidad de telemetría y telecomando y monitorización de portadoras. Algunas de estas estaciones se encuentran en Maspalomas, Balcarce, Ciudad de México, Bogotá, etc.
- **Axess Network:** se trata de una empresa líder mundial en soluciones de telecomunicaciones satelitales. AXESS [27] cuenta con una infraestructura global, reconocida por la WTA (World Teleport Association), operando cuatro gateways principales ubicados en Alemania, México, Colombia y dos alternativos en Emiratos Árabes y Perú.

- **OneWeb:** compañía de comunicaciones globales que se dedica a la prestación de servicios mayoristas a firmas tales como proveedores de servicios de Internet y operadoras de comunicaciones. Tras completar a principios de 2023 [28] su constelación de satélites LEO, la empresa está añadiendo las estaciones terrestres que necesita para ofrecer sus servicios en todo el mundo.

3. Proveedores de Servicios de Telecomunicaciones y Redes Móviles:

- **Iridium:** Conocida por su red de satélites para comunicaciones móviles, Iridium opera estaciones terrestres para apoyar sus servicios de voz y datos. A pesar de que la red Iridium puede admitir todo el tráfico a través de una única puerta de enlace, la compañía siempre ha operado múltiples estaciones terrestres, en su práctica mayoría situadas en el hemisferio norte. [29]
- **Starlink:** es una empresa que nace como proyecto de la empresa SpaceX, con el objetivo de desplegar una constelación de satélites LEO que brinde un servicio de internet de alta velocidad y baja latencia a nivel global. Para proporcionar este servicio se requiere de una infraestructura que lo permita. Para ello, SpaceX construirá estaciones terrestres en todo el mundo, algunas de ellas estarán ubicadas en los centros de datos de Google. [30]

Estos son solo ejemplos y la lista no es exhaustiva. Además, es importante destacar que algunas estaciones terrestres pueden ser operadas por consorcios internacionales, y la cooperación entre diferentes países y empresas es común en el ámbito espacial.

3. Criterios y algoritmos para optimización de la ubicación de una estación terrestre

En este capítulo, se va a realizar una introducción a los principales criterios y algoritmos empleados para buscar las ubicaciones más óptimas donde desplegar una nueva estación terrestre.

El segmento terrestre es responsable de las comunicaciones entre la tierra y los satélites, lo que significa que debe estar a la altura de las necesidades de comunicación.

Para dimensionar el segmento terrestre y encontrar la ubicación ideal de una estación, se pueden tener en cuenta diferentes criterios y algoritmos que permitan encontrar la solución deseada. A lo largo de este capítulo, se detallará brevemente los criterios y algoritmos más utilizados en las estrategias de despliegue de estaciones terrestres.

3.1 Criterios

3.1.1 Atenuación por lluvia

La atenuación por lluvia se produce cuando las ondas electromagnéticas, como las señales de radio o microondas, atraviesan la lluvia en la atmósfera. Este fenómeno atmosférico se debe a la dispersión y absorción de las ondas electromagnéticas por las gotas de agua en la lluvia, y puede tener un impacto significativo en la calidad de la señal.

Este tipo de atenuación puede tener un impacto significativo en la disponibilidad del enlace entre la estación terrestre y el satélite, especialmente si la GS se encuentra en regiones donde las lluvias son frecuentes o intensas. Este fenómeno tiene una mayor influencia en la calidad del enlace que otros atenuantes climatológicos.

La atenuación por lluvia depende, entre otros factores, de la frecuencia de operación. A mayores frecuencias de operación, mayor es la atenuación producida. Es por ello que las

bandas Ku, Ka, o las bandas Q/V son más sensibles a este tipo de atenuación que otras bandas de frecuencias menores.

Además, hay otros factores que influyen en este tipo de atenuación como es el ángulo de elevación de la antena, la tasa de lluvia, el tamaño de las gotas, la longitud del enlace, etc.

3.1.2 Visibilidad

La visibilidad entre un satélite y su estación terrestre es un factor crítico para el funcionamiento de un enlace de comunicación satelital.

Para que un enlace satelital funcione de manera efectiva, debe existir una línea de visión directa (LOS, de sus siglas en inglés Line of Sight) entre el satélite y la estación terrestre. Esto significa que no debe haber obstáculos significativos que bloqueen la señal entre ambos puntos. Es por ello que la ubicación de la estación terrestre es esencial. Debe estar ubicada de manera que tenga una línea de visión directa con el satélite en el cielo. Esto a menudo significa que la estación terrestre se coloca en un área elevada para maximizar la visibilidad.

Asimismo, otro factor importante es la cobertura del satélite, ya que, si una estación terrestre está fuera de la zona de cobertura de un satélite en particular, no habrá visibilidad y, por lo tanto, no habrá comunicación.

El tipo de órbita en la que se encuentra el satélite también afecta la visibilidad. Como se ha comentado con anterioridad, los satélites en órbitas geoestacionarias se mantienen sobre la misma región de la Tierra lo que significa que proporcionan una visibilidad constante para las estaciones terrestres en su área de cobertura. En contraste, la visibilidad entre un satélite LEO y una estación terrestre es intermitente, debido al constante movimiento de estos satélites.

Además, la elevación y el azimut son ángulos importantes para determinar la visibilidad. Una elevación baja o un azimut inapropiado pueden resultar en una visibilidad deficiente.

3.1.3 Demanda de Tráfico

La demanda de tráfico es un aspecto clave a tener en cuenta en el dimensionamiento de las redes de telecomunicaciones.

La demanda de tráfico puede tener un impacto directo en la capacidad del enlace, ya que, si la demanda de tráfico es alta, es necesario contar con un enlace de comunicación satelital que pueda manejar un mayor volumen de datos.

También influye en la latencia, puesto que una mayor demanda implica un aumento de los recursos del canal lo que puede suponer una mayor latencia.

En situaciones de alta demanda de tráfico, el enlace entre el satélite y la estación terrestre puede experimentar congestión. Esto puede resultar en una degradación de la calidad de la señal y la velocidad de transmisión.

Es por ello, que es importante calcular la demanda de tráfico para planificar los recursos y dimensionar el enlace con el fin de optimizar la gestión del tráfico y garantizar un uso eficiente del ancho de banda disponible.

3.1.4 Ángulo de elevación

El ángulo de elevación de un satélite es la medida angular desde el horizonte hasta la posición de la línea que une el satélite en el espacio con un punto de observación en la Tierra. Este ángulo describe la altura aparente del satélite sobre el horizonte desde la perspectiva de la estación terrestre.

Un ángulo de elevación de 0 grados indica que el satélite está justo en el horizonte, mientras que un ángulo de elevación de 90 grados significa que el satélite se encuentra directamente sobre la estación.

Este ángulo es importante en aplicaciones de comunicación por satélite, ya que influye en la capacidad de la antena receptora para apuntar correctamente hacia el satélite para recibir

la señal con la mejor intensidad posible. Cuanto mayor sea el ángulo de elevación, más directamente apuntará la antena hacia el satélite y mejor será la calidad de la comunicación.

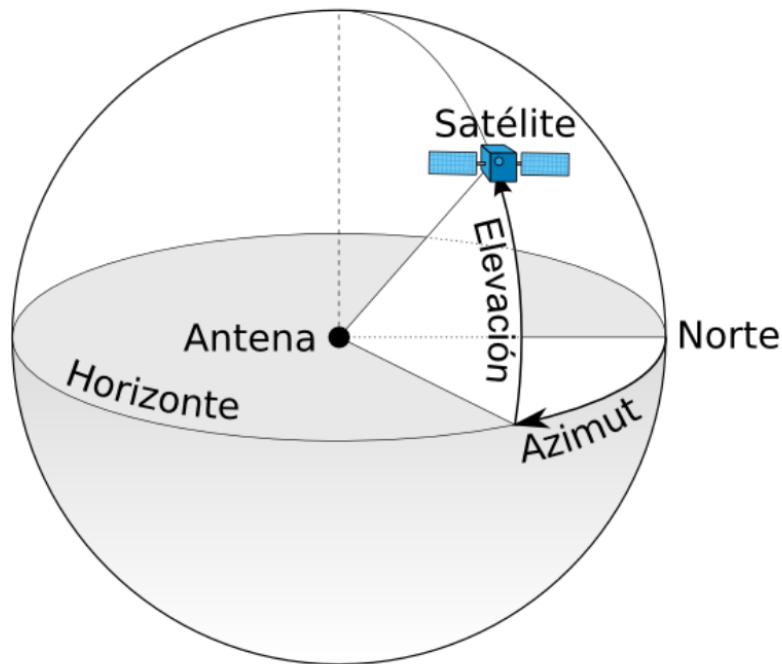


Figura 4: Descripción gráfica del ángulo de elevación

3.1.5 Disponibilidad de enlace

La disponibilidad de un enlace satelital se refiere a la probabilidad de que dicho enlace esté operativo y funcione correctamente durante un período específico. La disponibilidad es un factor crítico en las comunicaciones por satélite, ya que afecta directamente la confiabilidad y la continuidad del servicio de comunicación.

La disponibilidad de un enlace satelital se puede ver afectada por varios factores como son las condiciones atmosféricas, las interferencias electromagnéticas, obstrucciones en la línea de visión, fallos técnicos de los equipos que intervienen en la comunicación, etc.

La disponibilidad se expresa generalmente como un porcentaje y se calcula como la proporción del tiempo total en el que el enlace está operativo respecto al tiempo total

considerado. Es decir, una disponibilidad del 99.9% indica que el enlace está operativo el 99.9% del tiempo considerado.

Uno de los retos en el diseño y la configuración de los sistemas de comunicación por satélite es maximizar la disponibilidad, considerando estos factores y empleando estrategias como el uso de antenas direccionales, redundancia en equipos críticos y técnicas de mitigación de interferencias para garantizar la máxima continuidad en la comunicación.

3.2 Algoritmos

3.2.1 Algoritmo de fuerza bruta

El algoritmo de fuerza bruta es un método directo y simple para resolver problemas que consiste en probar sistemáticamente todas las posibles soluciones y verificar cuál de ellas es la correcta. No se basa en estrategias sofisticadas, sino en la exhaustiva búsqueda de soluciones.

Su implementación implica probar todas las combinaciones posibles hasta encontrar la solución deseada. A menudo, es la estrategia menos eficiente en términos de tiempo y recursos computacionales, ya que su tiempo de ejecución puede aumentar exponencialmente con el tamaño del problema.

Aunque es simple y garantiza encontrar la solución si está dentro de las posibles combinaciones, este método puede ser extremadamente lento e ineficiente para problemas complejos o con un gran número de combinaciones.

3.2.2 Algoritmo de optimización por enjambre de partículas

El algoritmo de optimización basado en enjambre de partículas [31] (PSO, por sus siglas en inglés Particle Swarm Optimization) es una técnica de optimización inspirada en el comportamiento social de las partículas en la naturaleza.

Este algoritmo se utiliza para resolver problemas de optimización global, donde se busca encontrar el mejor valor posible, para una función dada. Funciona manteniendo una población de posibles soluciones, representadas como partículas en un espacio de búsqueda. Cada partícula tiene una posición y una velocidad en ese espacio.

La idea principal detrás de PSO es que el movimiento de cada partícula se ve influido por su mejor posición local hallada hasta el momento, así como por las mejores posiciones globales encontradas por otras partículas a medida que recorren el espacio de búsqueda.

Con el tiempo, las partículas tienden a converger hacia la región de soluciones óptimas basadas en la información compartida entre ellas. El PSO es efectivo para encontrar soluciones en espacios de búsqueda complejos y se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, como optimización de funciones matemáticas, problemas de ingeniería, o entrenamiento de redes neuronales, entre otros.

3.2.3 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos [32] (AG) son métodos inspirados en el proceso de selección natural y que imita la evolución biológica como estrategia para resolver problemas de optimización. Estos algoritmos se utilizan para encontrar soluciones aproximadas o óptimas para problemas de optimización combinatoria y de búsqueda.

El proceso de un algoritmo genético se asemeja a la evolución biológica y consta de varios componentes. Los AG hacen evolucionar una población de individuos, o conjunto de soluciones posibles del problema, sometiéndola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica tales como reproducción, mutaciones y recombinaciones genéticas; así como también a una selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuáles los menos aptos, que son descartados, conduciendo así a una convergencia hacia soluciones más óptimas o adecuadas para el problema.

Los algoritmos genéticos son utilizados en una amplia gama de aplicaciones, como la optimización de funciones matemáticas, diseño de sistemas, diseño de redes, entre otros, debido a su capacidad para buscar soluciones en espacios de búsqueda complejos y grandes.

3.2.4 Algoritmo de recocido simulado

El algoritmo de recocido simulado [33] (Simulated Annealing, SA) es un método de optimización metaheurístico utilizado para buscar soluciones aproximadas a problemas de optimización combinatoria y continua. Este algoritmo está inspirado en el proceso metalúrgico del recocido, donde un material se enfría lentamente para alcanzar su estado de mínima energía.

Esta analogía [34] es aplicada en el algoritmo de recocido simulado dado que el proceso para encontrar el punto óptimo será acercarnos a una solución, alejarnos de esa posible solución explorando nuevas alternativas que surgen después de realizar pequeñas modificaciones o perturbaciones de la solución actual. Posteriormente se evalúa la diferencia de los resultados obtenidos entre la nueva solución y la solución actual. Si la nueva solución es mejor que la actual, se acepta como nueva solución actual. En caso contrario, se puede aceptar esta solución con una cierta probabilidad que va disminuyendo, permitiendo la aceptación ocasional de soluciones subóptimas en etapas tempranas del algoritmo, lo que lleva al algoritmo a converger hacia una solución más óptima.

El algoritmo de recocido simulado está diseñado para escapar de óptimos locales y explorar el espacio de búsqueda de manera más amplia, permitiendo ocasionalmente tendencias a soluciones subóptimas antes de converger hacia una solución aproximadamente óptima. Se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, como problemas de diseño, planificación, asignación de recursos y otras áreas de optimización.

4. Estrategias de despliegue de las estaciones terrestres

La ubicación donde se despliega una GS es de gran relevancia puesto que impacta directamente en el rendimiento de las comunicaciones por satélites LEO y, dependiendo de la posición geográfica donde se realice el despliegue se pueden obtener diferentes condiciones de canal y servicio debido a las diferentes condiciones atmosféricas, a la población, el número de usuarios, afectando así a la cobertura del servicio y a las prestaciones de acceso a la red.

Si el despliegue de las GS se realiza en un emplazamiento ideal se conseguirá una mejora de las capacidades del sistema permitiendo reducir el retardo de las comunicaciones, el número de saltos, una mejora de la calidad del enlace, optimizar la eficiencia de enrutamiento de la red, etc.

Hasta ahora se han realizado varios estudios sobre el despliegue de GS en constelaciones de satélites geoestacionarios, pero pocos estudios se han centrado en constelaciones LEO para poder dar una solución a este problema, y las investigaciones existentes se han realizado con una gran variedad de criterios como se puede observar en las tablas 2 y 3, al final de esta sección, que recogen la diversidad de parámetros, algoritmos, criterios y objetivos de estos estudios.

Algunos de estos estudios, se aborda el tema como un problema de optimización y utilizan algoritmos para tratar de encontrar una solución, mientras que en otras ocasiones se utiliza el método heurístico o no se aborda como un problema de optimización.

4.1 Estudios basados en algoritmos de optimización

Los autores de [35] y [36] realizaron un estudio sobre la optimización de la ubicación de GS enfocado en solventar el problema de la integración entre las comunicaciones terrestres y

las satelitales. Sin embargo, en ambos casos, la GS era seleccionada basándose en nodos terrestres ya existentes.

Los autores de [37] han realizado una investigación sobre la ubicación óptima de una GS con el fin de disminuir el uso de los enlaces inter satelitales (ISL de sus siglas en inglés, intersatellite link). Para ello han evaluado el uso de estos enlaces mediante dos métodos: midiendo la métrica del uso de los enlaces mediante una fórmula en la que el recuento de saltos se pondera por el tráfico y mediante la propuesta de un modelo analítico para calcular el número de saltos necesarios. Con estos dos modelos, se propone un algoritmo de optimización binaria discreta por enjambre de partículas (IBD-PSO) y se verifica mediante comparaciones, que los resultados superan a los obtenidos mediante otros algoritmos similares. En la Figura 5 se muestra el número medio de saltos, \bar{H} , desde la ubicación más óptima de GW obtenida entre diferentes números de pasarelas. Cuanto mayor es el número de pasarelas, mayores son las opciones de los satélites y menores los saltos que necesitan para llegar a un GW concreto. Cabe destacar, que el rango de ubicaciones de este estudio se limitó únicamente a China.

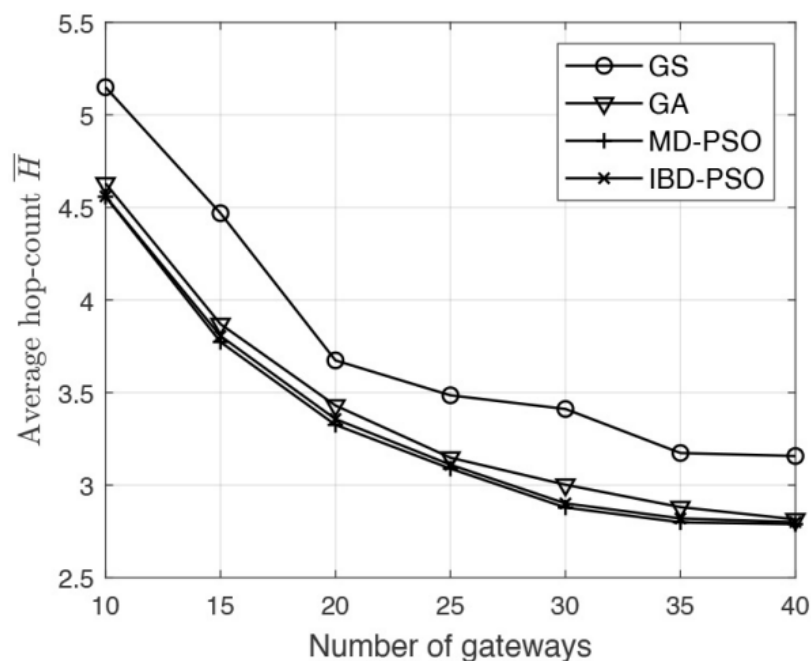


Figura 5: Número medio de saltos para los GW situados en mejores ubicaciones obtenidos mediante diferentes algoritmos de optimización. [37]

En [38] se investiga el problema de la localización de GS en un sistema de comunicación por satélite LEO de banda ancha enfocado en la minimización del retardo. Para llevar a cabo esta investigación se plantearon tres modelos diferentes: uno de ellos basado en el balance del enlace de alimentación, que son aquellos enlaces de transmisión entre los satélites LEO y las GS, otro estima la demanda de usuarios por cada zona mediante una ponderación entre la densidad de población, el nivel de desarrollo económico de la zona y la proporción de mercado de las comunicaciones por satélite, y por último, un modelo basado en el enrutamiento de enlaces inter satelitales, ya que se estima que cada satélite establece entre dos y cuatro enlaces inter satelitales. Una vez definidos los modelos se presentan dos algoritmos de optimización para resolver el problema, un algoritmo genético (GA) y otro de recocido simulado (SA). Los resultados de la investigación arrojan que el SA destaca frente al GA, pero a costa de una mayor complejidad computacional. Sin embargo, se observa que mediante el algoritmo GA se puede obtener una solución aproximada, pero con un menor coste computacional.

Utilizando los dos algoritmos mencionados en el párrafo anterior, GA y SA, un estudio [39] ha formulado el mismo problema, pero con el objetivo minimizar el número de saltos para la transmisión de datos entre satélites y maximizar la capacidad de los enlaces de alimentación. Los resultados de este estudio también demuestran que comparado con los despliegues en ubicaciones aleatorias, estos algoritmos pueden disminuir en un 42,6% el número de saltos entre enlaces inter satelitales y aumentar en un 4,4% la capacidad de los enlaces de alimentación.

En el estudio realizado en [40] se propone un método de optimización de la ubicación de GS (GPO, de Gateway Placement Optimization) para redes de satélites LEO con el fin de resolver el problema modelándolo como un problema de optimización combinada. Esta investigación tiene como objetivo identificar las mejores ubicaciones de GS que permitan equilibrar las cargas de tráfico utilizando el menor número posible de pasarelas. En este trabajo se han tenido en cuenta las restricciones que hay que satisfacer en cuanto a los enlaces físicos entre las GS y los satélites, en concreto, la interferencia en los enlaces, el ancho de banda y el número de antenas de los satélites.

En primer lugar, se estima la matriz de tráfico desde las GS y los satélites mediante un modelo gravitacional. A continuación, adoptan y modifican el algoritmo de optimización

discreta por enjambre de partículas (PSO) con el fin de resolver el problema y, por último, aplican el método GPO a pruebas numéricas con constelaciones de satélites reales.

La ubicación de las GS también desempeña un papel muy importante en la integración entre las redes terrestres y los satélites LEO, (IsoLS-TNs, Integrated System of LEO Satellites and Terrestrial Networks). En esto se centra un estudio [41] que tiene como objetivo maximizar los ingresos totales de la demanda de servicio dentro de la cobertura, minimizando al mismo tiempo la distancia media de acceso y el número de GS desplegadas. Para ello se diseña un mecanismo de asignación de recursos distribuidos (DRA) basado en el algoritmo del método de multiplicadores en direcciones alternas (ADMM) para calcular la demanda de servicio dentro del rango de cobertura. Asimismo, se propone un algoritmo de despliegue de GS basado en un algoritmo genético combinado con el método ADMM para el algoritmo DRA. Por último, mediante simulaciones masivas basadas en datos reales, se valida la eficacia del algoritmo propuesto con el fin de mejorar la utilización de los recursos de la red, garantizar la confidencialidad de la información y aumentar el rendimiento y la cobertura.

En [42] se detalla un estudio realizado para el despliegue de GS para megaconstelaciones de satélites LEO siguiendo el criterio de minimizar la interferencia entre los enlaces de alimentación en constelaciones masivas puesto que, según se indica en el estudio, se han realizado otras investigaciones teniendo en cuenta el retardo, el número de saltos, la capacidad del sistema, pero no este tipo de interferencia. Esto se puede deber a que, en una constelación dispersa, el número de satélites que tienen visibilidad con la GS es reducido y por tanto la interferencia entre enlaces de alimentación es pequeña y puede ser despreciada. Sin embargo, esto no ocurre en constelaciones masivas donde si es necesario tener en cuenta esta interferencia a la hora de desplegar una GS. En este estudio, primero se realiza una descripción de las constelaciones de satélites LEO a gran escala (LS-LEOSCN), a continuación, se realiza un análisis de la interferencia entre enlaces de alimentación y la capacidad del sistema, y posteriormente se propone un algoritmo de optimización basado en genética para resolver este problema y se demuestra que se puede incrementar la capacidad del sistema hasta en un 6,9 % frente a un despliegue aleatorio.

I.Portillo, M.Sánchez y el resto de autores de [43] realizaron en 2017 un amplio estudio sobre la ubicación óptima de una estación terrestre óptica (OGS, Optic Ground Station) basándose en una solución de pareto óptimo. Esto quiere decir que la ubicación ideal es aquella en la

que no se puede optimizar el valor de ninguno de los criterios tenidos en cuenta en la investigación sin que el resto de parámetros sufra una degradación. Para ello se basaron en 3 modelos: un modelo atmosférico que tiene en cuenta las condiciones meteorológicas como son la temperatura, humedad, viento, lluvia y nubes; un modelo de disponibilidad y latencia en el que se tiene en cuenta el porcentaje de tiempo que el satélite en órbita puede establecer conexión con la OGS y la latencia entre dos conexiones consecutivas; y además otro modelo de costes en el que se tiene en cuenta los costes económicos del despliegue de la OGS. En este último modelo se tienen en cuenta los costes no recurrentes, que serían los relacionados con el despliegue y que solo se tienen en cuenta una única vez, y los costes recurrentes que son los asociados a la operación y mantenimiento de la OGS como pueden ser los sueldos de los empleados, los costes del mantenimiento de la red y los costes de mantenimiento de la instalación.

Los resultados muestran que la principal variable para determinar las ubicaciones óptimas de las OGS es la probabilidad de nubes en esa ubicación, lo que da lugar a que las instalaciones de latitud polar dejan de ser atractivas, ya que sufren altas probabilidades de nubes durante todos los meses del año. En su lugar, las OGS situadas en la banda de latitud entre 20° y 40° en ambos hemisferios se consideran las ubicaciones más atractivas. Además, se observa que las tecnologías ópticas ofrecen velocidades de transmisión de datos más de 3 veces superiores a las de la tecnología de radiofrecuencia, y permiten descargar un mayor volumen de datos.

En [44] se proponen dos algoritmos de optimización para la selección óptima de las ubicaciones de las GS óptimas con el fin de mitigar eficazmente el bloqueo por nubes y alcanzar una disponibilidad mínima requerida. En este estudio, no puede seleccionarse cualquier punto de la Tierra como posible ubicación de la GS, puesto que las ubicaciones han sido seleccionadas dentro del área de visibilidad de los satélites, escogiendo las zonas que tienen visibilidad durante más tiempo.

4.2 Otros estudios

En [45] se detalla el estudio realizado sobre el despliegue de constelaciones LEO a grandes escalas a través de análisis y simulaciones. En este despliegue está incluido el despliegue de la GS, puesto que lo consideran una parte clave del sistema en términos de rendimiento del sistema y del servicio. Para ello han adoptado un método denominado IGSD-MRM (Iterative Gateway Station Deployment- Marginal Revenue Maximized, de sus siglas en inglés), que consiste en elegir la GS con el máximo rendimiento marginal de cada iteración. Los parámetros que se han tenido en cuenta en este estudio son la demanda de tráfico, la constelación de satélites y los enlaces, tanto de usuario, como de alimentación e intersatelitales.

Los autores de la investigación realizada en [46] y [47] intentaron definir un modelo matemático que permitiese predecir la visibilidad de los satélites polares LEO sincronizados con el sol en cuanto a número de visiones diarias del satélite desde la GS y el tiempo total de las mismas. Para nuestro trabajo no es tan relevante la exactitud del modelo matemático definido, si no qué parámetros afectan a estas visiones y cómo. De esta investigación podemos concluir que el número de visiones diarias del satélite depende principalmente de la latitud de la estación. Cuánto más cerca de los polos terrestres se encuentre la estación mayor es el número de visiones diarias. Asimismo, se puede observar que otros parámetros como la longitud donde se encuentre situada la estación o la altitud de la órbita del satélite también influyen, pero no en la misma medida. Algo parecido ocurre con el tiempo total de estas visiones, puesto que también depende principalmente de la latitud de la GS y en menor medida de la altitud de la órbita del satélite. Sin embargo, en este caso, la longitud de la ubicación de la GS no influye en el tiempo de visibilidad del satélite.

En [48] se realiza un estudio sobre como influyen diferentes parámetros en el área de cobertura de recepción de una estación terrestre. Algunos de estos parámetros son la altitud del satélite, el ángulo de elevación de la antena receptora, la visibilidad del satélite, cuestiones económicas, etc. En el estudio se puede observar cómo cuánto menor es el ángulo de elevación, mayor es el área de cobertura de la estación. En la Figura 3 se puede observar una comparación entre el ángulo de elevación y la dimensión del área de cobertura en kilómetros para diferentes altitudes del satélite:

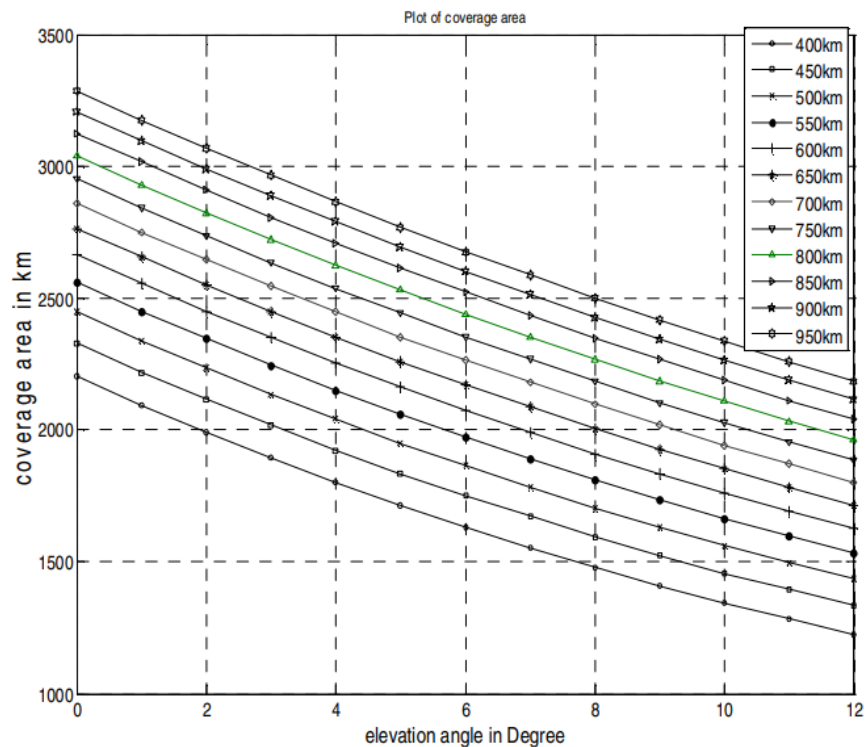


Figura 6: Ángulo de elevación de la antena vs Área de cobertura en km para diferentes altitudes [48]

Cuanto más pequeño sea el ángulo de elevación, mayor debe ser el tamaño de la antena como resultado de algunas restricciones medioambientales que suponen una degradación de la señal. Sin embargo, cuanto mayor es el tamaño de la antena menor es el área de cobertura. Por esta razón, es importante encontrar un compromiso entre los parámetros que afectan al área de cobertura y las restricciones de los mismos para alcanzar un equilibrio que permita determinar la ubicación más óptima para una GS.

En [49] se detalla el estudio que llevaron a cabo sus autores sobre el impacto del ángulo de elevación de una GS en banda S en la relación señal a ruido (S/N). Se llega a la conclusión de que, durante la misma trayectoria de un satélite, el alcance se puede ver afectado dependiendo del ángulo de elevación sobre la estación terrestre. Al igual que en [48] se llega a la conclusión de que el alcance es mayor cuanto menor sea la elevación de la trayectoria del satélite sobre la estación terrestre. Esto se debe en parte a que la variación del alcance provoca cambios en las pérdidas por propagación en espacio libre, siendo este valor inversamente proporcional al ángulo de elevación según se puede observar en la Figura 7

que muestra los resultados obtenidos en el estudio. Por tanto, las pérdidas son mínimas cuando el ángulo de elevación es máximo, es decir, 90° , esto es cuando el satélite está justo encima de la GS. Esto permite maximizar la relación S/N y por tanto el alcance es mayor.

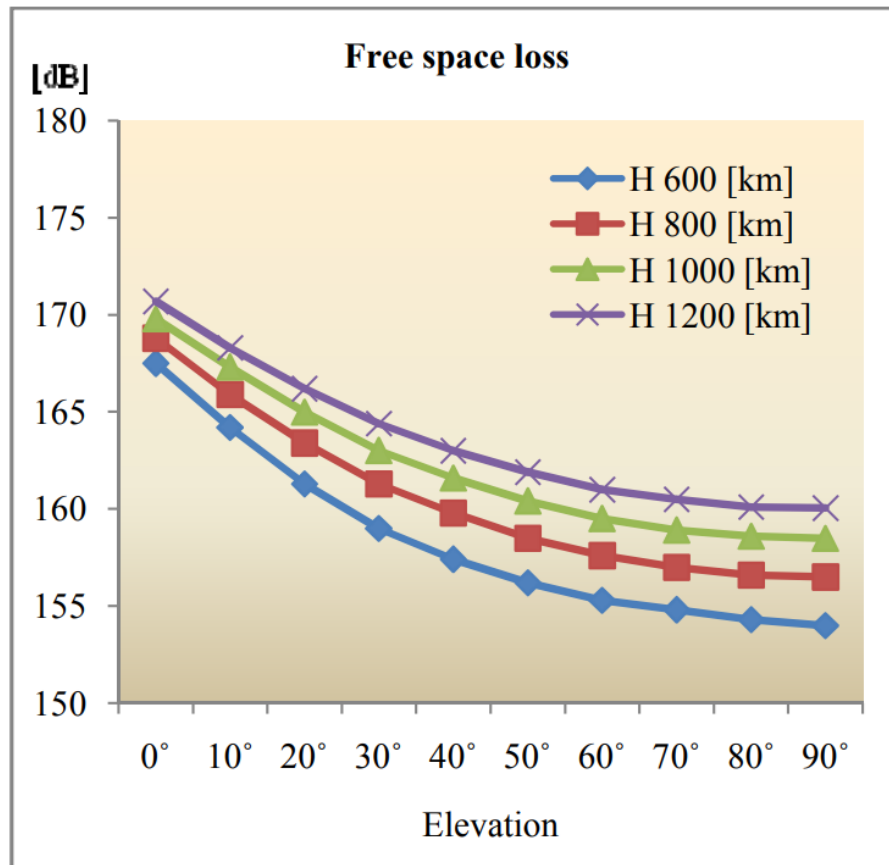


Figura 7: Pérdidas de propagación en espacio libre para diferentes ángulos de elevación [49]

En 2018, se publicó un estudio en el que analizaban las prestaciones de constelaciones de satélites LEO en las que los enlaces de alimentación operaban en banda E, y a su vez lo comparaban frente a las que utilizan enlaces de alimentación en bandas Q/V [50]. Para realizar esta comparación se realiza un estudio de la arquitectura de estas constelaciones, de las métricas de calidad del servicio (QoS), y para nuestro interés, de las localizaciones de las GS. Realizan una optimización de las ubicaciones de las GS, ya que consideran que es una parte fundamental que influye directamente en el rendimiento y las capacidades del sistema. Esta optimización la realizan a partir de una lista de candidatos de la ITU (ITU Space Network List Database) y atendiendo a 3 criterios: las estaciones elegidas deben proporcionar cobertura a nivel global, los candidatos no deben presentar una fuerte

correlación espacial, es decir, debe haber una distancia suficiente entre ellos para que la correlación meteorológica espacial sea mínima y por tanto las condiciones atmosféricas de las GS se consideren independientes, y por último, los candidatos elegidos deben operar actualmente como telepuertos y formar parte del segmento terrestre de un sistema de comunicación por satélite a gran escala.

Los resultados de este estudio demuestran que efectivamente se pueden conseguir mejores resultados con un sistema operando en la banda E que en la banda Q/V, en concreto los resultados demuestran que las capacidades aumentan casi un 30% respecto a la banda Q/V y un 90% respecto a la banda Ka. Sin embargo, también se demuestra que el sistema en banda EHF requiere un mayor número de GS para proporcionar la misma cobertura con la misma QoS que los otros sistemas, que es contradictorio a lo que ocurre con los satélites GEO, ya que en este caso operar en bandas de frecuencias mayores permite reducir el número de estaciones terrestres.

En [51] se estudia la selección óptima de GSs en sistemas de satélite utilizando la técnica de diversidad de emplazamientos. Esto se debe a que la disponibilidad de los sistemas de comunicación por satélite se ve extremadamente afectada por las deficiencias atmosféricas, como la lluvia y la presencia de nubes. Puesto que la redundancia de GS induce mayores costes, se ha desarrollado un algoritmo de optimización global para minimizar el número de GS necesarios que deben componer una red de estaciones terrenas (GS) distribuidas geográficamente que permiten garantizar, con alta probabilidad, que al menos una GS esté disponible para conectarse al satélite en cada periodo de tiempo reduciendo la probabilidad de que todos los GS experimenten simultáneamente condiciones meteorológicas adversas.

Como se puede observar se han realizado estudios sobre el despliegue de GS basándose en diferentes criterios. En el estudio realizado en [52] se intenta buscar una solución al problema unificando diferentes criterios con el fin de obtener una mejor solución que las hasta ahora planteadas, realizando un dimensionamiento del segmento terrestre de Europa teniendo en cuenta la atenuación por lluvia, la demanda de tráfico y la visibilidad. Para ello se definen unos umbrales para cada criterio que servirán como condición para seleccionar una ubicación y mediante iteraciones se comprueba si una localización, definida mediante un par de coordenadas, cumple con los umbrales de cada criterio.

Cada criterio es representado como un mapa, que se trata como una matriz. Se realizan iteraciones en cada uno de los mapas comprobando que se cumple la condición fijada para cada criterio. Si un par de coordenadas cumple todas las condiciones, se añade a la lista de posibles ubicaciones donde desplegar una GS.

En [53] se reflejan los avances de este mismo estudio ampliando las opciones a todo el globo terráqueo. Además, se realiza una comparación de los resultados obtenidos de combinar de dos en dos los diferentes criterios, y los resultados obtenidos tras combinar todos los criterios a la vez. Esto aporta una idea sobre la influencia que tiene cada criterio en determinación de la ubicación de las GS. Sin embargo, esta influencia también depende del umbral fijado para cada criterio, el cual no está optimizado.

En la Figura 8 se puede observar el enfoque dado en ambos estudios, mientras que en la Figura 9 se muestra el porcentaje de posiciones candidatas para el despliegue de un GW.

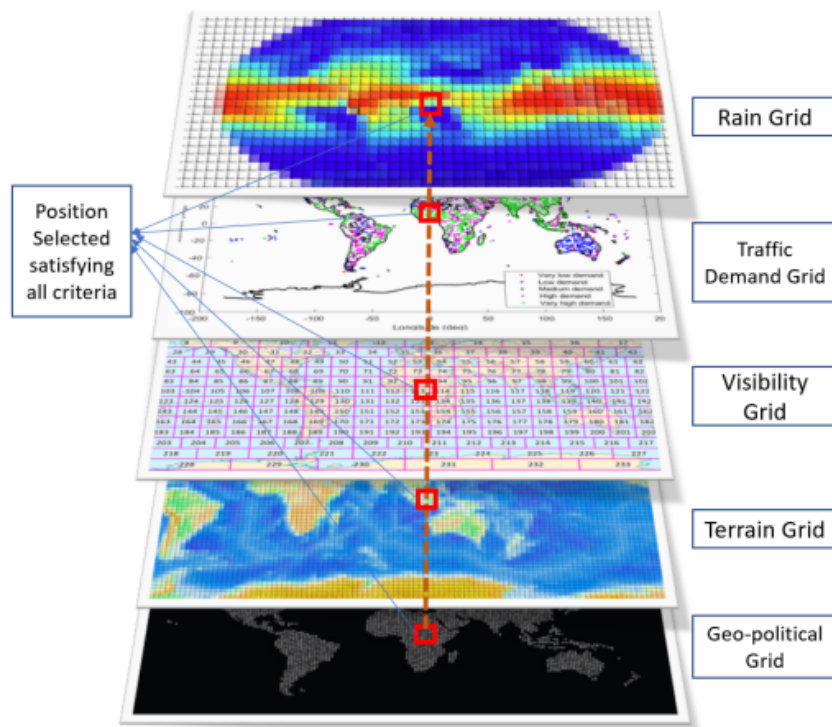


Figura 8: Modelo de mapas seguido en [52] y [53]

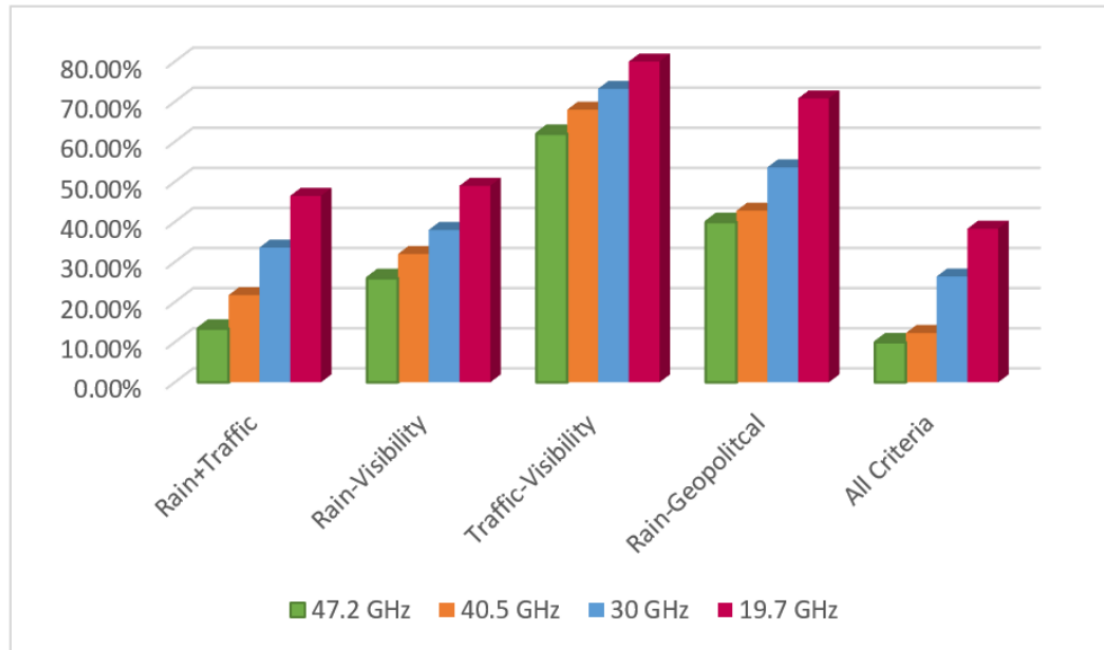


Figura 9: Porcentaje de posiciones candidatas para el despliegue de un GW según los criterios tenidos en cuenta [53]

4.1 Resumen y conclusión

A continuación, en las Tablas I y II se puede observar un breve resumen y comparación entre todas las literaturas revisadas. Algunas celdas de la Tabla I están señaladas como N/A. Esto es debido a que esa información no viene reflejada en los documentos.

Es importante mencionar que para la redacción de esta sección también se han analizado otros muchos estudios que finalmente no se han incluido al no encontrarse información relevante para este proyecto. Algunos de estos estudios son [54],[55],[56],[57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], etc.

Referencia	Banda Frecuencia	Parámetros
[35]	N/A	N/A
[36]	N/A	N/A
[37]	Ku, Ka	Constelación LEO Starlink Altitud: 550 km Inclinación de órbita: 53º
[38]	Ka Frecuencia de enlace de alimentación: 28 GHz Frecuencia de enlace de usuario: 18 GHz	Altitud de la órbita: 1680 km Número de órbitas: 12 Número de satélites: 96
[39]	Ka Frecuencia portadora: 20 GHz Frecuencia de enlace de usuario: 18 GHz	Altitud de la órbita: 1680 km Número de satélites: 72 Inclinación de órbita: 50º
[40]	N/A	Conjunto 1: -Altitud: 1000 km -Número de satélites: 12 -Inclinación de órbita: 99.5º -Ángulo elevación: 20º Conjunto 2: -Altitud: 1248 km -Número de satélites: 9 -Inclinación de órbita: 37.4º -Ángulo de elevación: 20º
[41]	Ka Frecuencia central: 28.75 GHz	Altitud: 1070 km Nº de planos: 6 Nº de satélites: 10 Inclinación de órbita: 86.7º
[42]	Ku, Ka	Constelación LEO Starlink Número de órbitas: 72 Número de satélites por órbita: 22 Inclinación de órbita: 53º
[43]	N/A	Altitud: 385, 508, 617, 640, 702, 802 y 1097 km Ángulo de elevación: 6, 51.64, 63.4, 97.5, 97.87, 97.9 y 98.5º
[44]	N/A	N/A
[45]	N/A	Altitud: 507.1 km Inclinación de órbita: 87º Mínima elevación de enlace de alimentación: 10º Mínima elevación de enlace de usuario: 25º
[46]	N/A	Varios conjuntos con diferentes parámetros

[47]	N/A	Varios conjuntos con diferentes parámetros
[48]	L, X	Altitud: 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 950 km Ángulo de elevación: 2, 4.5, 7, 9.2, 11.5, 13.7 y 14.7º
[49]	S	Altitud: 600, 800, 1000 y 1200 km Ángulo de elevación: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90º
[50]	V, Ku, Ka	Constelaciones: OneWeb-Ka, OneWeb-V, Boeing-V, SpaceX-Ka, TeleSat -Ka, Telesat -V
[51]	N/A	N/A
[52]	Ku, Ka Frecuencias: 19.7 GHz, 30 GHz, 40.5 GHz, 47.2 GHz	Disponibilidad: 99.9% o 99.5% Ángulo de elevación: 10º o 30º Altitud: 800km o 1200km
[53]	Ku, Ka Frecuencias: 19.7 GHz, 30 GHz, 40.5 GHz, 47.2 GHz	Disponibilidad: 99%, 99.9% o 99.99% Ángulo de elevación: 10º o 30º Altitud: 800km

Tabla 1: Comparación de parámetros de los diversos estudios revisados

Referencia	Optimización de la ubicación de GS	Algoritmo	Criterios	Objetivo
[35]	Si	Algoritmo óptimo de fuerza bruta (OBFA) Algoritmo de optimización basado en enjambre de partículas (PSOA)	Retardo de la red	Integración redes terrestres
[36]	Si	Algoritmo de óptima enumeración de ubicación Algoritmo heurístico de ubicación inteligente	Tráfico Topología de la red	Integración redes terrestres
[37]	Si	Algoritmo de optimización binaria discreta por enjambre de partículas (IBD-PSO)	Métricas de uso de enlaces ISL	Disminuir uso de enlaces inter satelitales
[38]	Si	Algoritmo genético (GA) Recocido simulado (SA)	Balace de enlace alimentación Demanda de tráfico Enrutamiento de enlaces inter satelitales	Minimizar el retardo
[39]	Si	Algoritmo genético (GA) Recocido simulado (SA)	Número y localización de usuarios, estaciones terrestres y satélites	Minimizar nº saltos Maximizar capacidad enlaces ISL
[40]	Si	Optimización discreta por enjambre de partículas	Interferencia en los enlaces Ancho de banda Nº antenas de los satélites	Balace de tráfico entre el menor nº de GS posibles

[41]	Si	Algoritmo genético (GA) combinado con algoritmo del método de multiplicadores en direcciones alternas (ADMM) Mecanismo de asignación de recursos distribuidos (DRA)	Arquitectura de red Demanda de tráfico Atenuación por lluvia	Mejorar utilización de recursos de la red Minimizar distancia media de acceso a la red Aumentar rendimiento y cobertura
[42]	Si	Algoritmo genético (GA)	Interferencia entre satélites Retardo Número de saltos Capacidad del sistema	Analizar despliegue de LS-LEOSCN minimizando la interferencia entre enlaces de alimentación
[43]	Si	No	Condiciones atmosféricas Disponibilidad de la red y latencia Costes económicos	Definir ubicación óptima de una GS óptica
[44]	Si	Método heurístico	Ubicación de los satélites Región de visibilidad del satélite Porcentaje de disponibilidad respecto a bloqueo por nubes	Mitigar el bloqueo por nubes Asegurar una disponibilidad mínima requerida
[45]	No	No	Demanda de tráfico Constelación de satélite Enlaces (usuario, alimentación, ISL)	Despliegue de constelaciones LEO masivas
[46]	No	No	Latitud y longitud de la GS Altitud del satélite	Determinar nº de visiones diarias de un satélite
[47]	No	No	Latitud y longitud de la GS Altitud del satélite	Determinar nº de visiones diarias de un satélite

[48]	No	No	Altitud del satélite Ángulo de elevación de antena receptora Visibilidad del satélite	Determinar influencia de diferentes parámetros en el área de cobertura de una GS
[49]	No	No	Ángulo de elevación Pérdidas por propagación en espacio libre Relación señal a ruido (S/N)	Analizar impacto del ángulo de elevación de una GS sobre la S/N
[50]	No	No	Ubicación de la GS Métricas del sistema	Analizar prestaciones de una GS con el enlace de alimentación operando en banda E
[51]	No	Algoritmo de optimización global branch-and-bound (B&B), basado en la relajación de la programación lineal (LP) y en un método greedy	Condiciones atmosféricas Disponibilidad de la red Nº de GS	Reducir el número de GS necesarias para diversidad de emplazamientos
[52]	Si	Método heurístico	Atenuación por lluvia Demanda de tráfico Visibilidad del satélite	Definir ubicación óptima de una GS
[53]	Si	Método heurístico	Atenuación por lluvia Demanda de tráfico Visibilidad del satélite	Definir ubicación óptima de una GS

Tabla 2: Comparación entre diversos estudios

Realizando un análisis de todos los estudios revisados, se observa que las bandas de frecuencia más utilizadas son las bandas Ku y Ka, especialmente la banda Ka. Esto puede deberse a que son bandas que utilizan longitudes de onda que permiten transportar gran cantidad de datos y traspasan la mayoría de obstáculos. Sin embargo, cabe mencionar que son bandas sensibles a la atenuación por lluvia y demás interferencias ambientales.

En cuanto a los algoritmos de optimización más utilizados, destacan los algoritmos genéticos. Esto puede deberse a que este tipo de algoritmos permite buscar soluciones aproximadas en campos de búsqueda grandes a un menor coste computacional en comparación con otro tipo de algoritmos.

Por último, como objetivo principal de estos estudios destaca la búsqueda del emplazamiento óptimo donde ubicar una estación terrestre teniendo en cuenta la atenuación por lluvia como criterio principal en la mayoría de trabajos.

Con estas conclusiones, el enfoque de nuestro trabajo se va a centrar en continuar la investigación realizada en [52] y [53] con el objetivo de conseguir resultados más precisos. Para ello, vamos a realizar un nuevo dimensionamiento del segmento terrestre siguiendo los criterios descritos en el siguiente capítulo y fijando nuevas condiciones, para obtener unos resultados más precisos.

5. Simulaciones y resultados

Se ha desarrollado en Matlab un programa que nos permite determinar las ubicaciones más óptimas donde desplegar una estación terrestre de acuerdo a los parámetros que hemos definido.

5.1 Metodología

Para desarrollar el programa, se ha seguido la misma metodología que en el estudio [53], la cual se puede observar en la Figura 7.

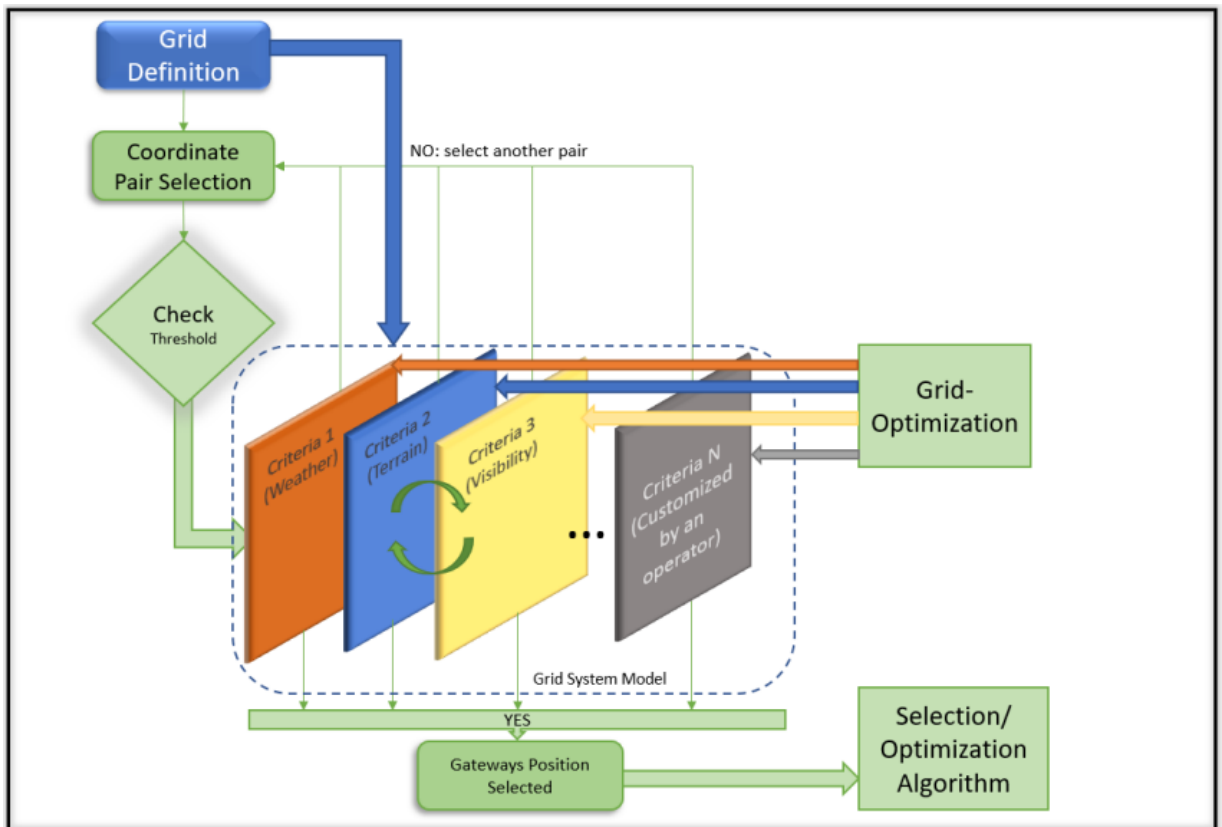


Figura 10: Metodología y lógica del programa definido en Matlab [53]

El procedimiento consiste en:

- **Paso 1:** establecer los diferentes criterios que vamos a tener en cuenta para realizar el dimensionamiento terrestre.

- **Paso 2:** definir un mapa para cada criterio. Cada mapa será una matriz de 3601x1801 donde las filas y las columnas se corresponden con la latitud y la longitud terrestre, respectivamente, de manera que cada posición de la matriz será una coordenada del globo terráqueo. Para definir los mapas, calcularemos el valor de cada coordenada para cada criterio y guardaremos el valor en la posición correspondiente de cada matriz.
- **Paso 3:** a continuación, debemos fijar un umbral para cada criterio.
- **Paso 4:** escoger un par de coordenadas y comprobar si cumple cada una de las condiciones fijadas para cada uno de los criterios. En el momento que un par de coordenadas no cumple alguna de las condiciones, el proceso se detiene automáticamente, descartando directamente la posición como candidato sin comprobar los criterios restantes. Esto significa que, a modo de ejemplo, si un par de coordenadas cumple la condición de atenuación por lluvia, pero no cumple el criterio fijado para el terreno, la posición es descartada y no se comprueban el resto de criterios.
- **Paso 5:** repetir el paso 4 con todos los pares de coordenadas.
- **Paso 6:** guardar las posiciones candidatas en una nueva matriz y representar estas coordenadas en el mapa. En esta matriz solo se guardarán aquellas posiciones que cumplan las condiciones establecidas para todos los criterios.

5.2 Criterios

Para calcular las localizaciones candidatas, se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

Atenuación por lluvia:

Para nuestro estudio, la atenuación por lluvia se ha calculado siguiendo el modelo desarrollado por Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), ITU-R P.618. Este modelo ha sido revisado en varias ocasiones para mejorar su precisión. En concreto, la versión utilizada en este Trabajo es la ITU-R P.618-13 [64].

Tipo de Terreno:

Otro criterio utilizado en este proyecto para definir las ubicaciones óptimas donde desplegar una GS, es el tipo de terreno donde situarlas, es decir, si se trata de tierra o agua.

Para definir la matriz del terreno, primero cargamos una imagen del mapa terrestre y la convertimos a escala de grises. Posteriormente, creamos un umbral y comprobamos si cada pixel de la imagen es mayor que el umbral establecido. De esta manera, verificamos si el pixel que estamos comprobando es de color blanco y, por tanto, representa agua, o si, por el contrario, es negro y se trata de tierra. Así, creamos una nueva matriz binaria de 0 y 1, en la que las posiciones que valen 1 representan tierra, mientras que las posiciones que valen 0 representan agua.

Situación geo-política:

La situación geopolítica de un país se refiere a su posición y relaciones en el contexto internacional, incluyendo factores como sus fronteras, vecinos, alianzas, recursos estratégicos y su influencia en asuntos globales.

Las políticas y acciones de un país en el ámbito de la diplomacia y las relaciones exteriores son un aspecto clave a tener en cuenta para determinar la localización de una estación terrestre. A su vez, la presencia de conflictos internos o regionales también tienen un impacto significativo.

Para este Trabajo han sido excluidos aquellos países que actualmente están implicados en conflictos bélicos. Además, también se ha descartado aquellos países donde no se respetan los derechos humanos.

Algunos de los países descartados son:

- Ucrania
- Rusia
- Israel
- Palestina
- Afganistán
- Yemen
- Siria
- Corea del Norte
- Somalia
- Irán
- Irak

- Sudán
- Libia
- Etiopía
- Mali
- Myanmar
- República Democrática del Congo

Para crear la matriz del mapa geopolítico, se ha realizado el mismo procedimiento que para el mapa del terreno, descartando las coordenadas que ocupan estos países, poniendo su valor a 0.

Es importante mencionar, que a diferencia de la atenuación por lluvia y otros criterios, tanto el mapa del terreno como el mapa geopolítico son fijos, y no varían con la frecuencia, el ángulo de elevación u otros parámetros.

5.3 Resultados

Para obtener las posiciones candidatas, se definieron, en un principio, 36 casos de prueba. Cada caso tiene asociado una frecuencia determinada, un ángulo de elevación fijo, y un porcentaje de disponibilidad del enlace, como se observa en la Tabla 3.

Case-ID	Frequency (GHz)	Availability	Elevation
1.1	19.7	99.9%	10
1.2	19.7	99.9%	30
1.3	19.7	99.9%	90
1.4	19.7	99.5%	10
1.5	19.7	99.5%	30
1.6	19.7	99.5%	90
1.7	19.7	99%	10
1.8	19.7	99%	30
1.9	19.7	99%	90
2.1	30	99.9%	10
2.2	30	99.9%	30
2.3	30	99.9%	90
2.4	30	99.5%	10
2.5	30	99.5%	30
2.6	30	99.5%	90
2.7	30	99%	10
2.8	30	99%	30

2.9	30	99%	90
3.1	40.5	99.9%	10
3.2	40.5	99.9%	30
3.3	40.5	99.9%	90
3.4	40.5	99.5%	10
3.5	40.5	99.5%	30
3.6	40.5	99.5%	90
3.7	40.5	99%	10
3.8	40.5	99%	30
3.9	40.5	99%	90
4.1	47.2	99.9%	10
4.2	47.2	99.9%	30
4.3	47.2	99.9%	90
4.4	47.2	99.5%	10
4.5	47.2	99.5%	30
4.6	47.2	99.5%	90
4.7	47.2	99%	10
4.8	47.2	99%	30
4.9	47.2	99%	90

Tabla 3: Casos de prueba

Para cada caso de prueba se ha seguido el siguiente proceso:

- Primero de todo se calcula la matriz con los valores de la atenuación por lluvia en cada una de las coordenadas del globo terrestre.
- A continuación, se realiza un barrido para obtener la máxima atenuación por lluvia.
- A partir de este valor, se calculan los diferentes umbrales que deseamos fijar y se comprueba que posiciones cumplen una atenuación por lluvia menor que el umbral fijado. En nuestro caso, hemos fijado 3 umbrales: el 50%, 75% y 90% del valor máximo de atenuación.
- Una vez guardadas aquellas posiciones que cumplen la condición fijada para la atenuación de lluvia, comprobamos si cumplen la condición del tipo de terreno. Es decir, descartamos aquellas posiciones que se encuentren sobre una masa de agua.
- Una vez comprobada la atenuación por lluvia y el tipo de terreno, procedemos a descartar aquellas posiciones candidatas que se encuentren en países peligrosos o conflictivos.
- Por último, una vez que hemos comprobado todas las condiciones y tenemos las posiciones candidatas guardadas en una matriz, procedemos a dibujarlas sobre el mapa terrestre.

A continuación, en las siguientes tablas se indica el porcentaje de coordenadas candidatas según los criterios aplicados a los diferentes casos de pruebas. Además, para poder tener una visión más completa a la hora de analizar los resultados, se han simulado 12 casos pruebas adicionales, cuyos resultados se pueden observar en la Tabla 8.

Asimismo, a continuación de las tablas, se puede observar la representación de las posiciones resultantes. En la redacción de esta memoria, únicamente se han incluido las figuras de los resultados más y menos condicionantes de cada caso de prueba.

Case-ID	Max [dB]	Atenuación por lluvia		Atenuación por lluvia y terreno		Atenuación por lluvia, terreno y situación geopolítica		
		Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 90% umbral
1.1	65.486	11.348%	9.597%	2.759%	2.342%	2.011 %	1.628 %	0.725 %
1.2	25.73	11.693%	9.28%	2.855%	2.262%	2.093 %	1.544 %	0.519 %
1.3	29.893	12.371%	10.463%	3.063%	2.565%	2.27 %	1.83 %	1.1 %
1.4	28.5	11.486%	9.723%	2.794%	2.384%	2.041 %	1.663 %	0.84 %
1.5	10.876	11.817%	9.566%	2.889%	2.348%	2.12 %	1.615 %	0.633 %
1.6	12.484	12.478%	10.586%	3.098%	2.591%	2.3 %	1.855 %	1.203 %
1.7	12.55	11.427%	9.083%	2.772%	2.198%	2.022 %	1.486 %	0.492 %
1.8	6.03	11.519%	9.07%	2.787%	2.2%	2.034 %	1.487 %	0.537 %
1.9	5.83	11.98%	9.98%	2.87%	2.454%	2.099 %	1.725 %	0.95 %

Tabla 4: Porcentaje de coordenadas que cumplen att. lluvia por debajo del 50% y el 75% de la máxima atenuación para 19,7 GHz teniendo en cuenta diferentes criterios.

Case-ID	Max [dB]	Atenuación por lluvia		Atenuación por lluvia y terreno		Atenuación por lluvia, terreno y situación geopolítica		
		Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 90% umbral
2.1	115.306	11.0747 %	9.298 %	2.6942 %	2.255 %	1.955 %	1.562 %	0.556 %
2.2	49.663	11.456 %	8.899 %	2.787 %	2.146 %	2.034 %	1.44 %	0.426 %
2.3	69.475	12.318 %	10.445 %	3.038 %	2.562 %	2.247 %	1.827 %	1.11 %
2.4	52.081	11.203 %	9.434 %	2.72 %	2.298 %	1.976 %	1.593 %	0.655 %
2.5	21.921	11.576 %	9.203%	2.817 %	2.236 %	2.06 %	1.52 %	0.527 %
2.6	30.664	12.425 %	10.569 %	3.07 %	2.587 %	2.275 %	1.85 %	1.213 %
2.7	23.304	11.124 %	8.44 %	2.695 %	2.016 %	1.954 %	1.335 %	0.353 %
2.8	12.382	11.249 %	8.655 %	2.719 %	2.075 %	1.976 %	1.378 %	0.44 %
2.9	14.667	11.942 %	9.98 %	2.856 %	2.454 %	2.09 %	1.725 %	0.956 %

Tabla 5: Porcentaje de coordenadas que cumplen att.lluvia por debajo del 50% y el 75% de la máxima atenuación para 30 GHz teniendo en cuenta diferentes criterios.

Case-ID	Max [dB]	Atenuación por lluvia		Atenuación por lluvia y terreno		Atenuación por lluvia, terreno y situación geopolítica		
		Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 90% umbral
3.1	159.803	10.866 %	9.055 %	2.658 %	2.178 %	1.918 %	1.507 %	0.437 %
3.2	71.783	11.267 %	8.566 %	2.738 %	2.051 %	1.991 %	1.366 %	0.35 %
3.3	108.85	12.227 %	10.382 %	3.003 %	2.546 %	2.216 %	1.813 %	1.076 %
3.4	73.742	10.999 %	9.197 %	2.68 %	2.22 %	1.938 %	1.535 %	0.529 %
3.5	32.457	11.381 %	8.891 %	2.763 %	2.143 %	2.013 %	1.438 %	0.444 %
3.6	49.48	12.329 %	10.497 %	3.031 %	2.572 %	2.24 %	1.837 %	1.18 %
3.7	33.302	10.897 %	7.932 %	2.645 %	1.854 %	1.91 %	1.217 %	0.275 %
3.8	18.525	11.049 %	8.316 %	2.676 %	1.981 %	1.936 %	1.31 %	0.364 %
3.9	23.969	11.846 %	9.898 %	2.831 %	2.432 %	2.07 %	1.704 %	0.923 %

Tabla 6: Porcentaje de coordenadas que cumplen att. lluvia por debajo del 50% y el 75% de la máxima atenuación para 40.5 GHz teniendo en cuenta diferentes criterios.

Case-ID	Max [dB]	Atenuación por lluvia		Atenuación por lluvia y terreno		Atenuación por lluvia, terreno y situación geopolítica		
		Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 90% umbral
4.1	183.682	10.77 %	8.915 %	2.64 %	2.137 %	1.9 %	1.476 %	0.388 %
4.2	83.693	11.174 %	8.412 %	2.715 %	2.008 %	1.972 %	1.336 %	0.319 %
4.3	129.365	12.175 %	10.338 %	2.986 %	2.536 %	2.201 %	1.804 %	1.053 %
4.4	85.54	10.9 %	9.079 %	2.664 %	2.184 %	1.923 %	1.508 %	0.473 %
4.5	38.226	11.289 %	8.73 %	2.741 %	2.098 %	1.994 %	1.404 %	0.405 %
4.6	59.475	12.271 %	10.456 %	3.01 %	2.562 %	2.222 %	1.828 %	1.156 %
4.7	38.782	10.789 %	7.687 %	2.627 %	1.758 %	1.89 %	1.149 %	0.243 %
4.8	21.912	10.95 %	8.124 %	2.657 %	1.925 %	1.918 %	1.27 %	0.331 %
4.9	28.952	11.783 %	9.84 %	2.812 %	2.416 %	2.058 %	1.69 %	0.899 %

Tabla 7: Porcentaje de coordenadas que cumplen att.lluvia por debajo del 50% y el 75% de la máxima atenuación para 47.2 GHz teniendo en cuenta diferentes criterios.

Frequency (GHz)	Availability	Elevation	Max [dB]	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 50% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 75% umbral	Porcentaje de coordenadas que cumplen att < 90% umbral
28	99.9%	10	105.88	1.96 %	1.574 %	0.583 %
28	99.9%	30	45.046	2.045 %	1.459 %	0.442 %
28	99.9%	45	41.601	2.08 %	1.542%	0.545 %
28	99.9%	90	61.401	2.253 %	1.829 %	1.114 %
28	99.5%	10	47.558	1.986 %	1.605 %	0.684 %
28	99.5%	30	19.755	2.07 %	1.539 %	0.548 %
28	99.5%	45	17.984	2.099 %	1.611 %	0.644 %
28	99.5%	90	28.882	2.281 %	1.853 %	1.216 %
21	99%	10	21.229	1.965 %	1.356 %	0.375 %
28	99%	30	11.128	1.985 %	1.395 %	0.457 %
28	99%	45	9.398	1.978 %	1.398 %	0.503 %
28	99%	90	12.813	2.093 %	1.728 %	0.96 %

Tabla 8: Porcentaje de coordenadas para diversos umbrales de atenuación para 28 GHz

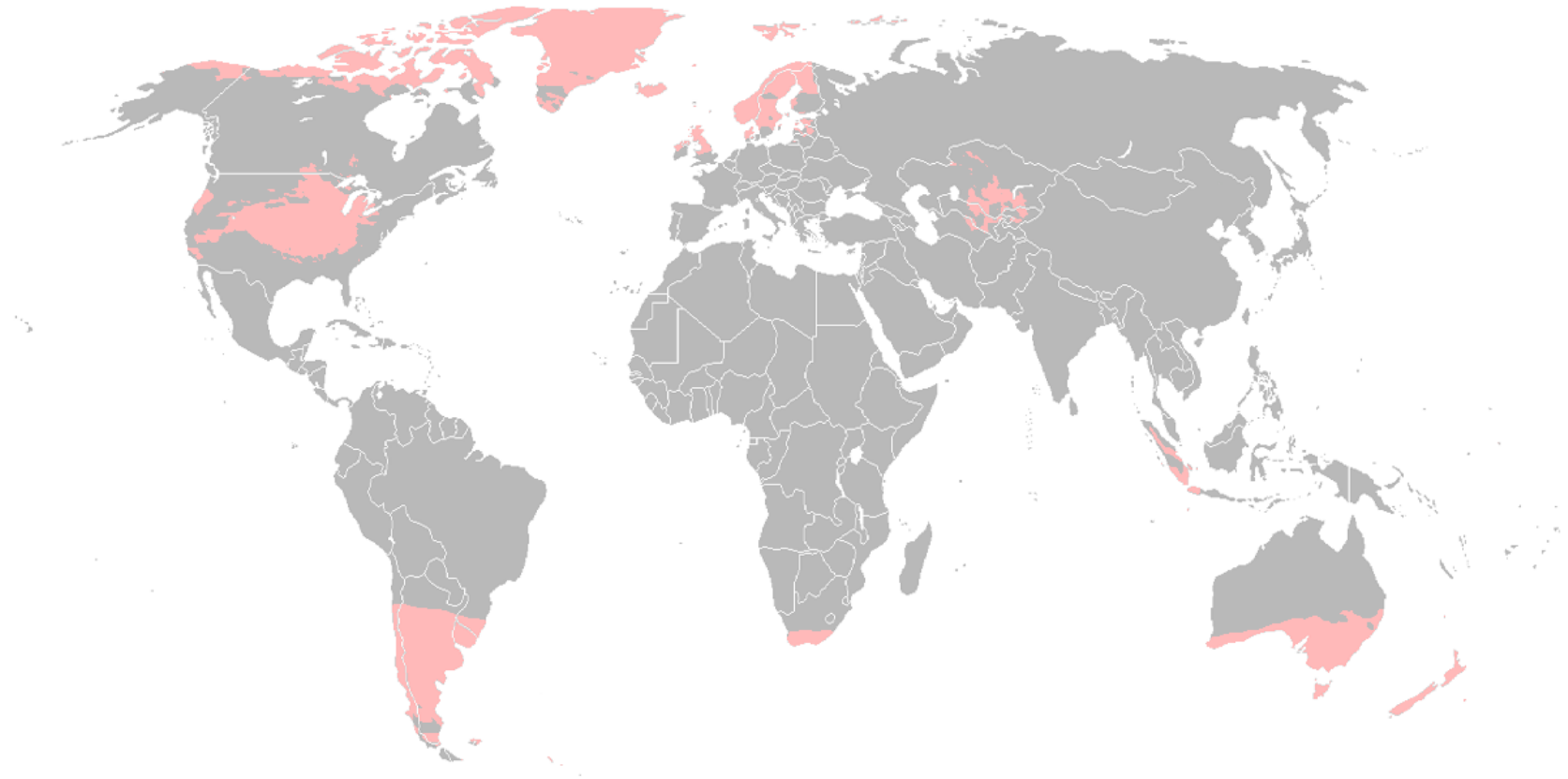


Figura 11: Candidatos para desplegar GS [Case-ID: 1.7: f:19.7 GHz, D:99% y elevación: 10°]

Emplazamientos para desplegar una GS

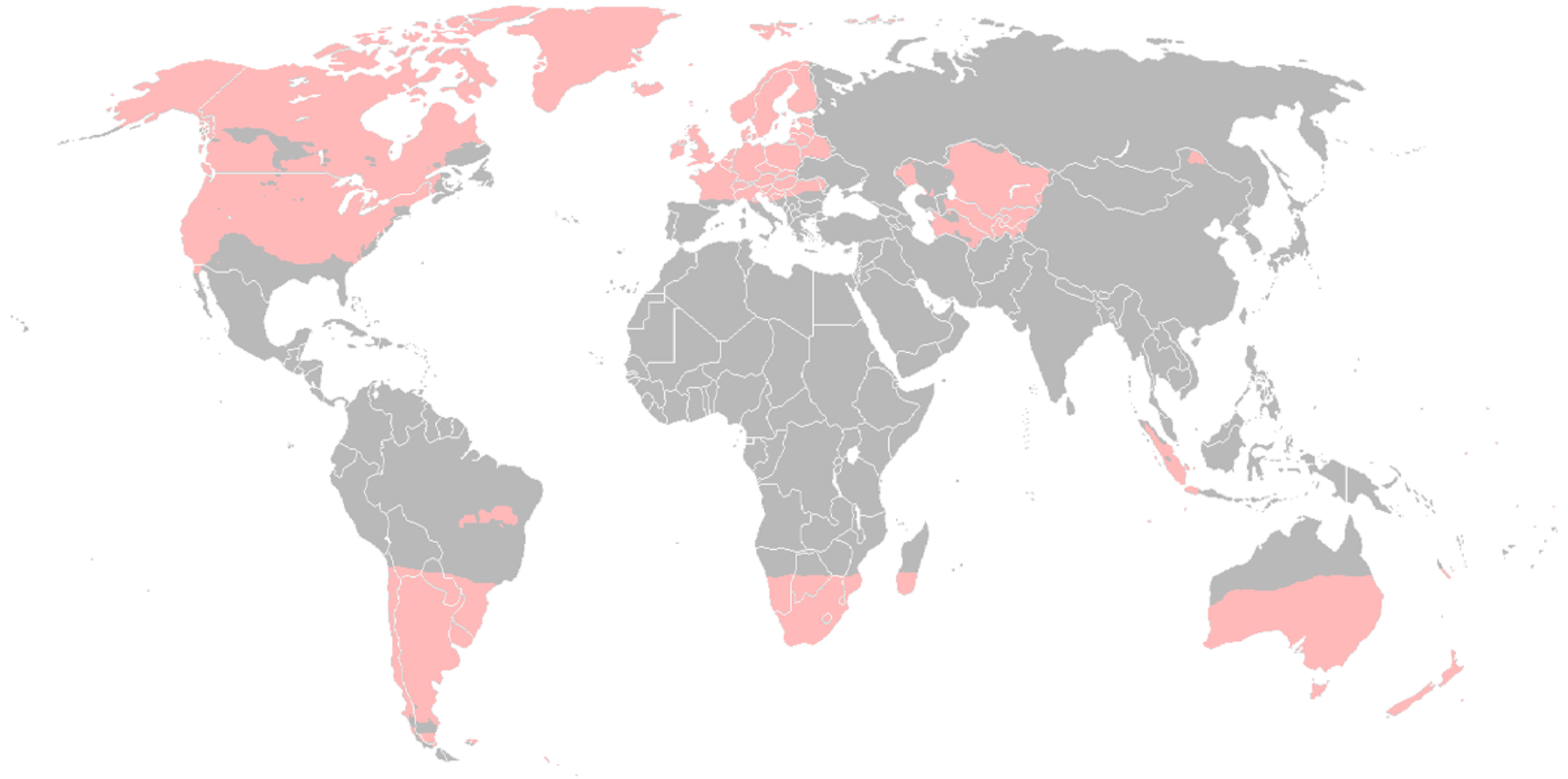


Figura 12: Candidatos para desplegar GS [Case-ID 1.6: f:19.7 GHz, D:99.5% y elevación: 90°]

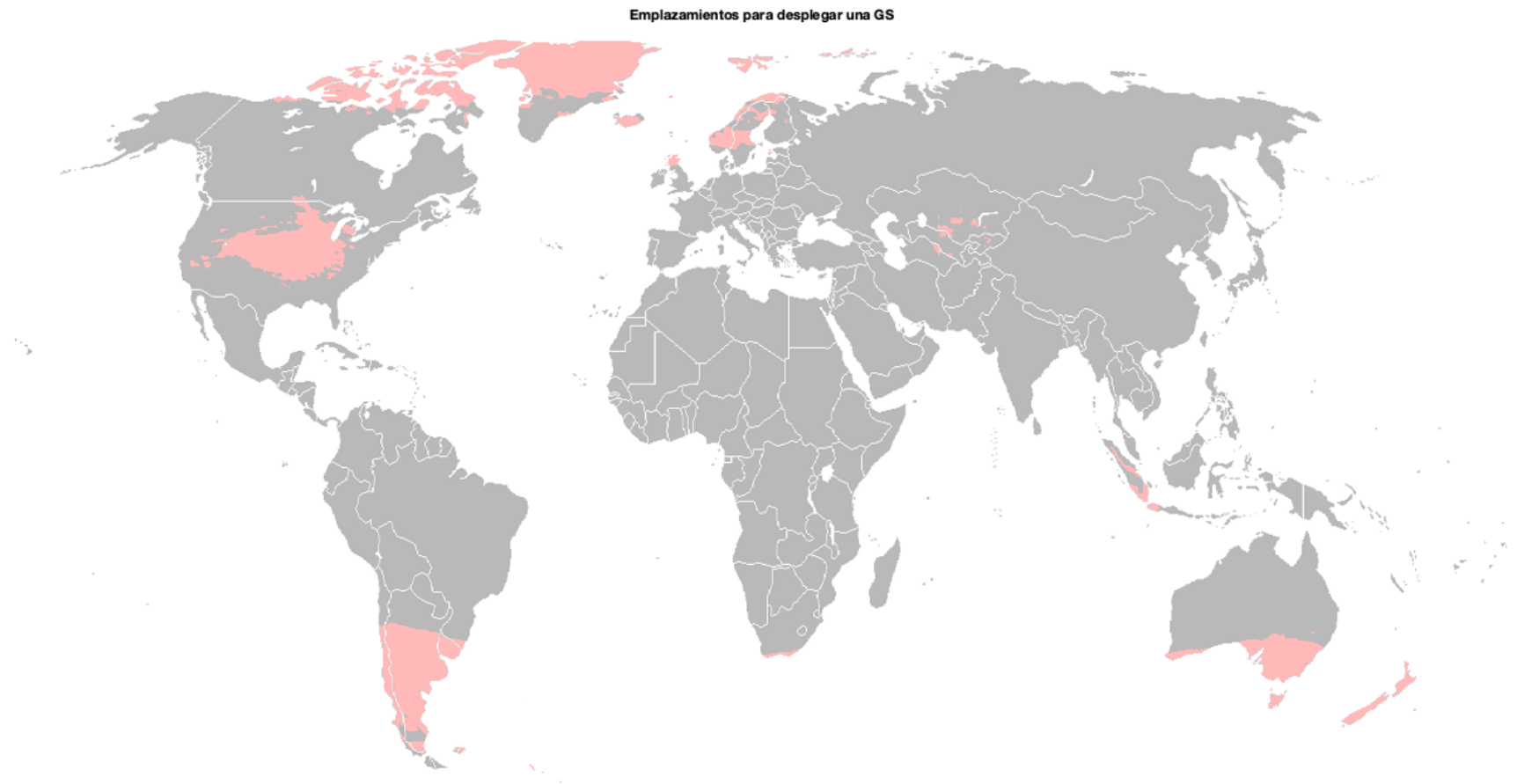


Figura 13: Candidatos para desplegar GS [Case-ID: 2.7: f:30 GHz, D:99% y elevación: 10°]

Emplazamientos para desplegar una GS

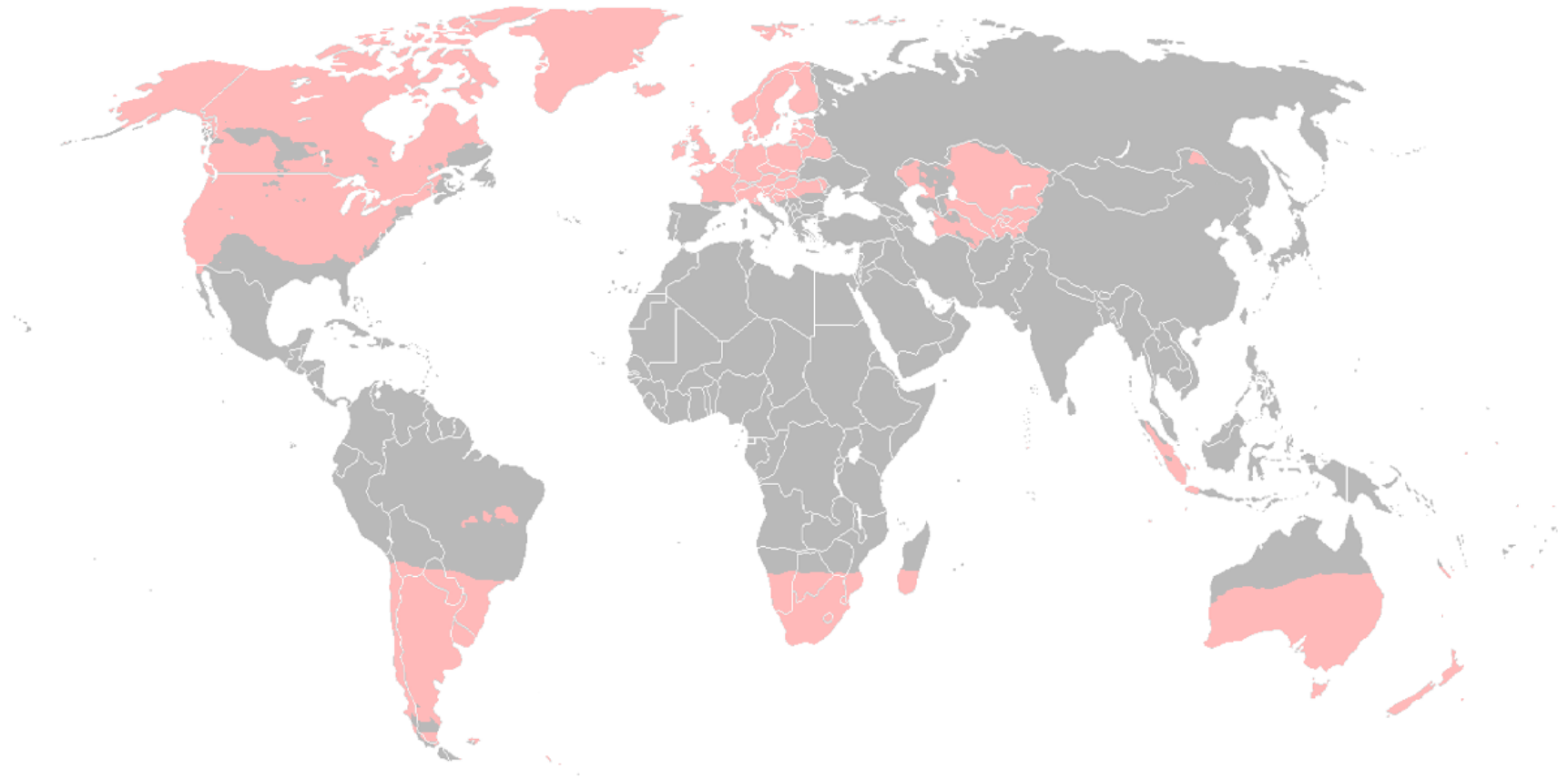


Figura 14: Candidatos para desplegar GS [Case-ID 2.6: $f:30$ GHz, $D:99.5\%$ y elevación: 90°]

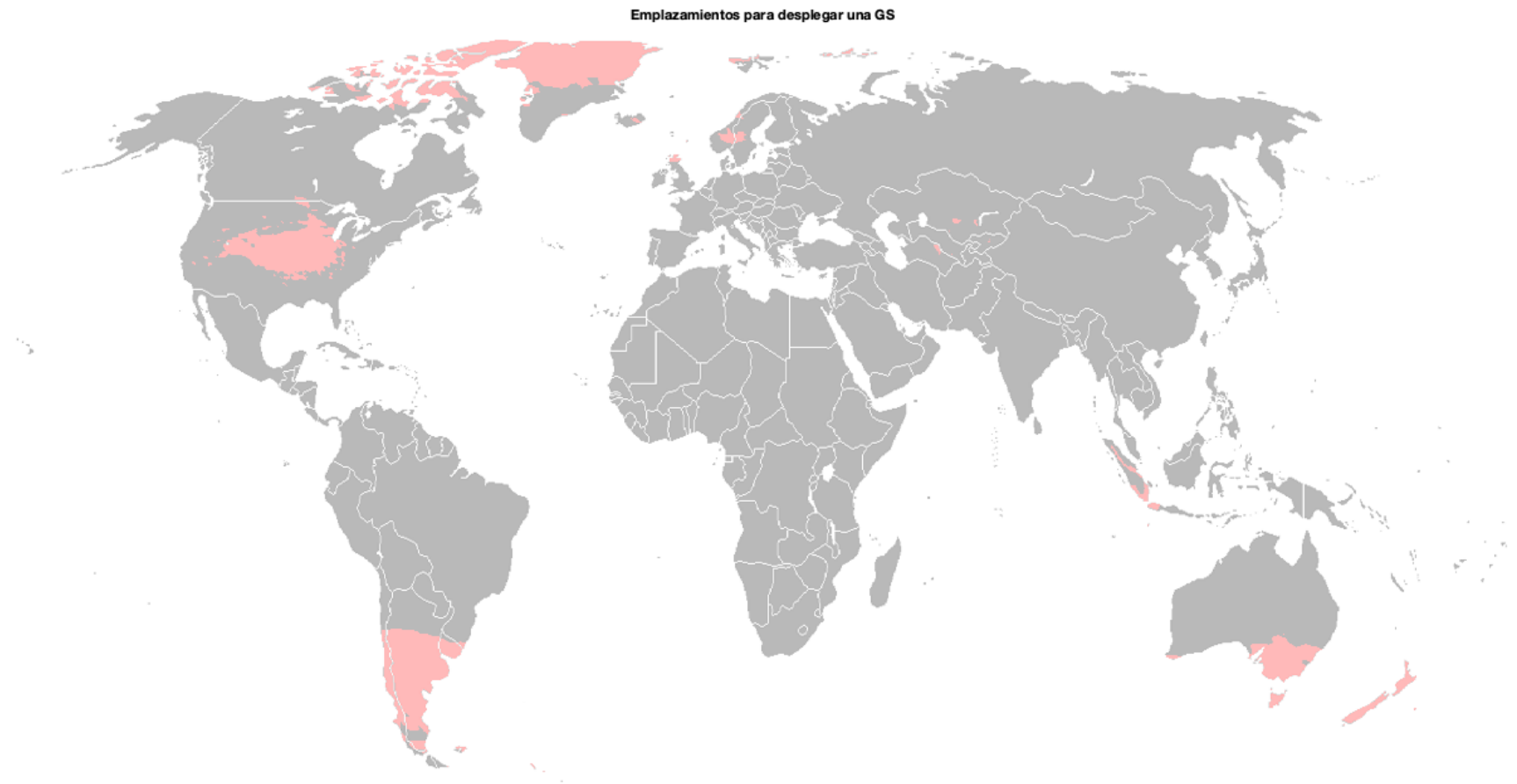


Figura 15: Candidatos para desplegar GS [Case-ID: 3.7: f:40.5 GHz, D:99% y elevación: 10°]

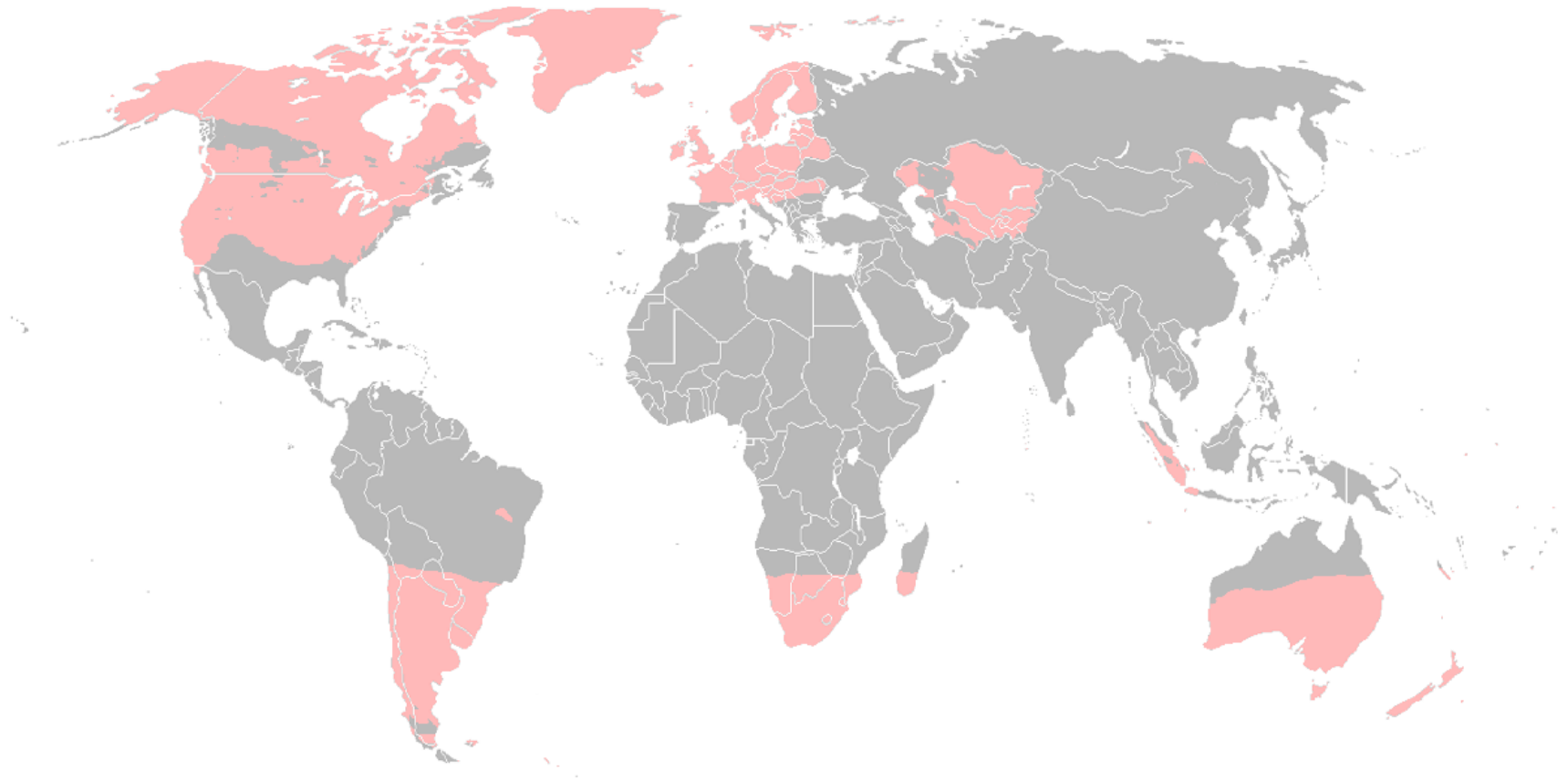


Figura 16: Candidatos para desplegar GS [Case-ID 3.6: f:40.5 GHz, D:99.5% y elevación: 90°]

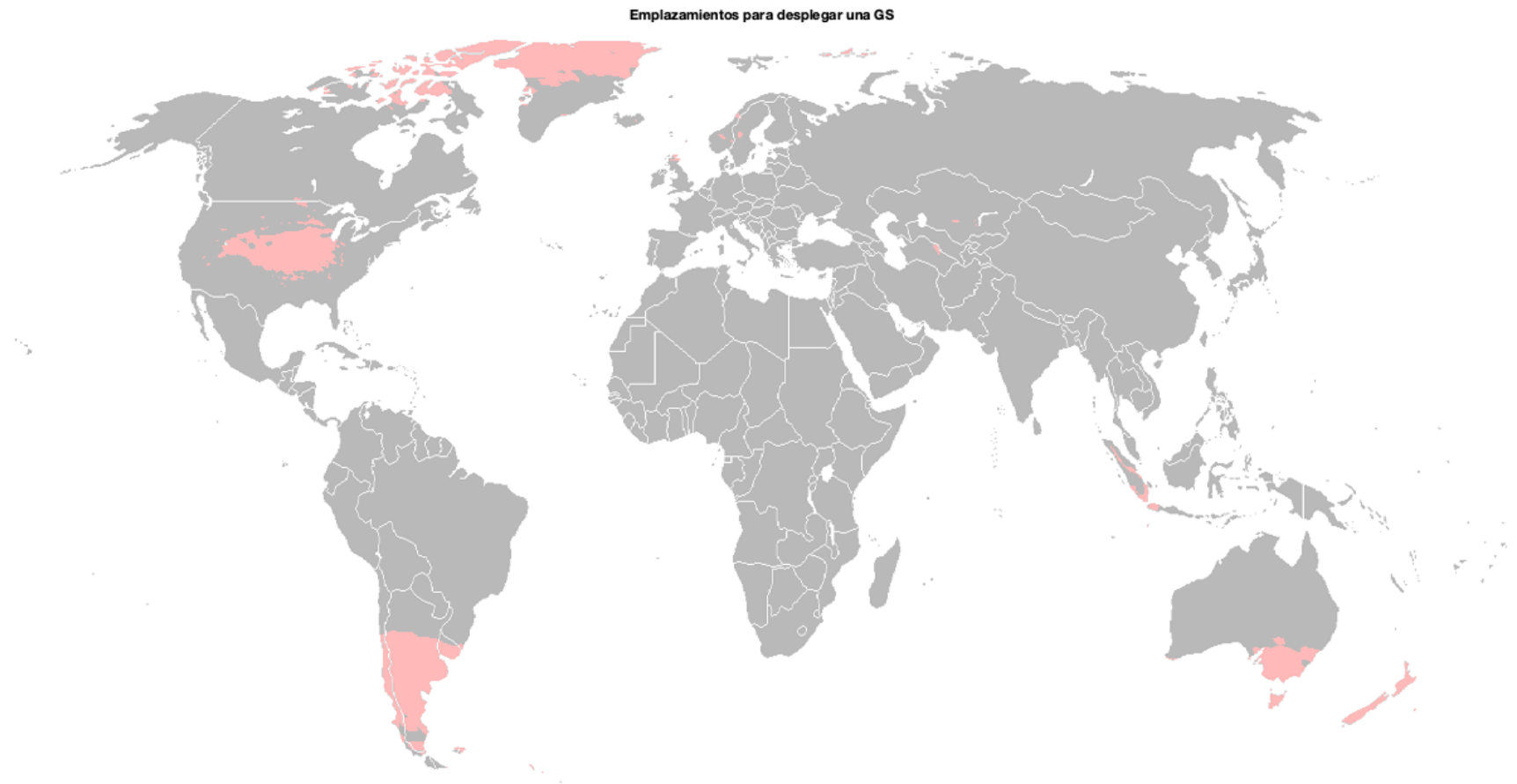


Figura 17: Candidatos para desplegar GS [Case-ID: 4.7: f:47.2 GHz, D:99% y elevación: 10°]

Emplazamientos para desplegar una GS

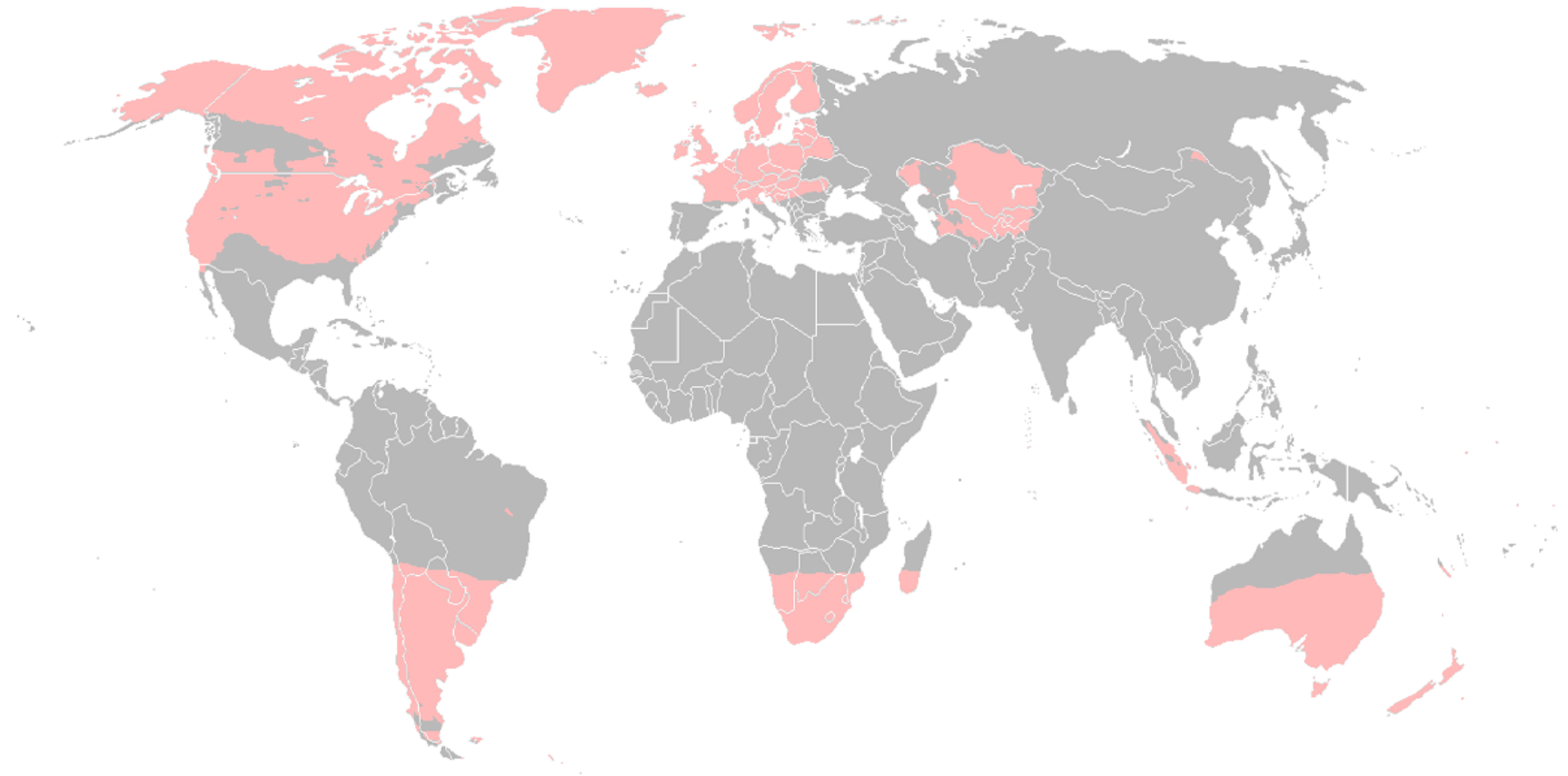


Figura 18: Candidatos para desplegar GS [Case-ID 4.6: $f:47.2$ GHz, $D:99.5\%$ y elevación: 90°]

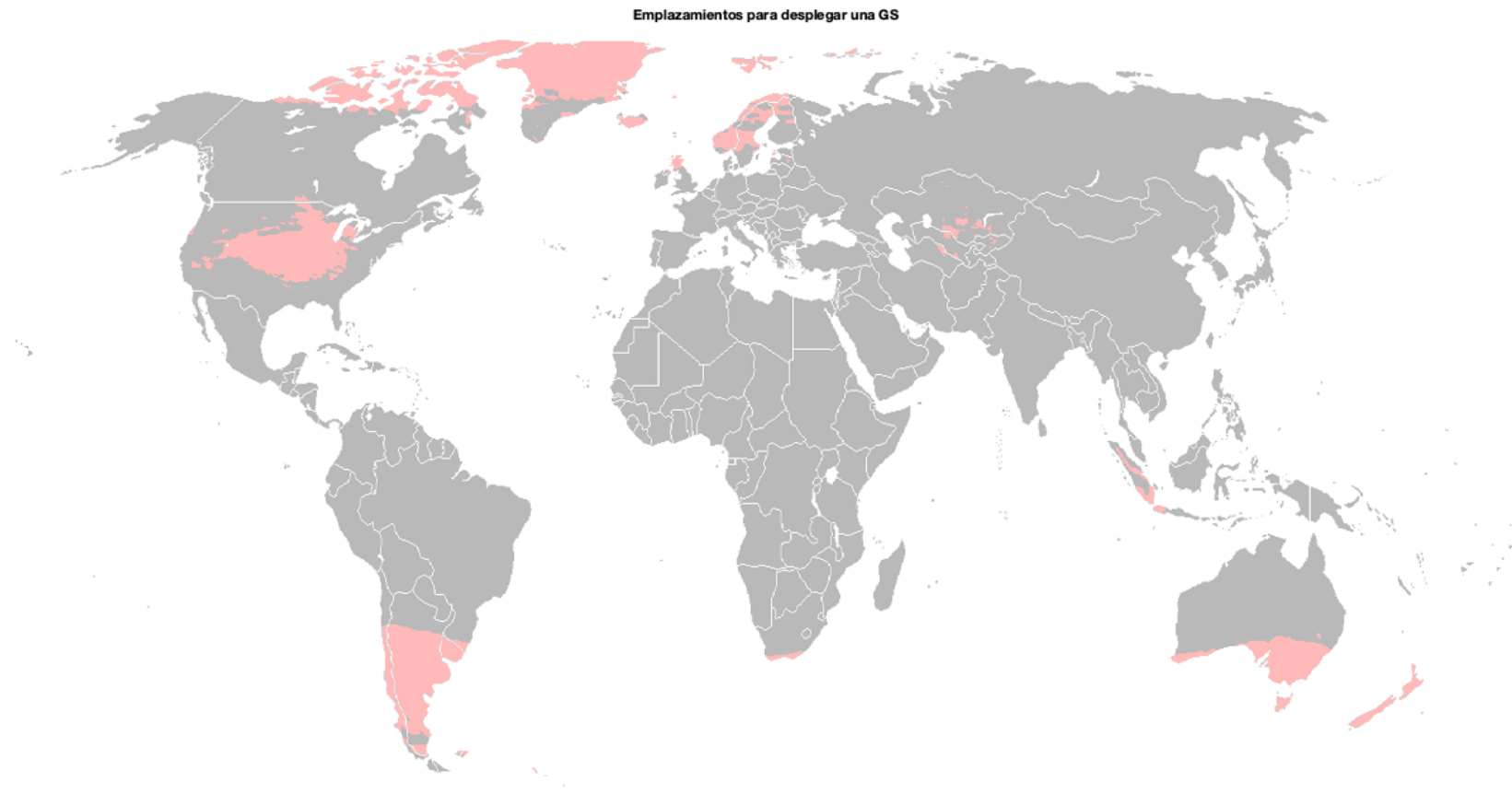


Figura 19: Candidatos para desplegar GS [frecuencia 28 GHz, disponibilidad 99% y 10° de ángulo de elevación]

Emplazamientos para desplegar una GS

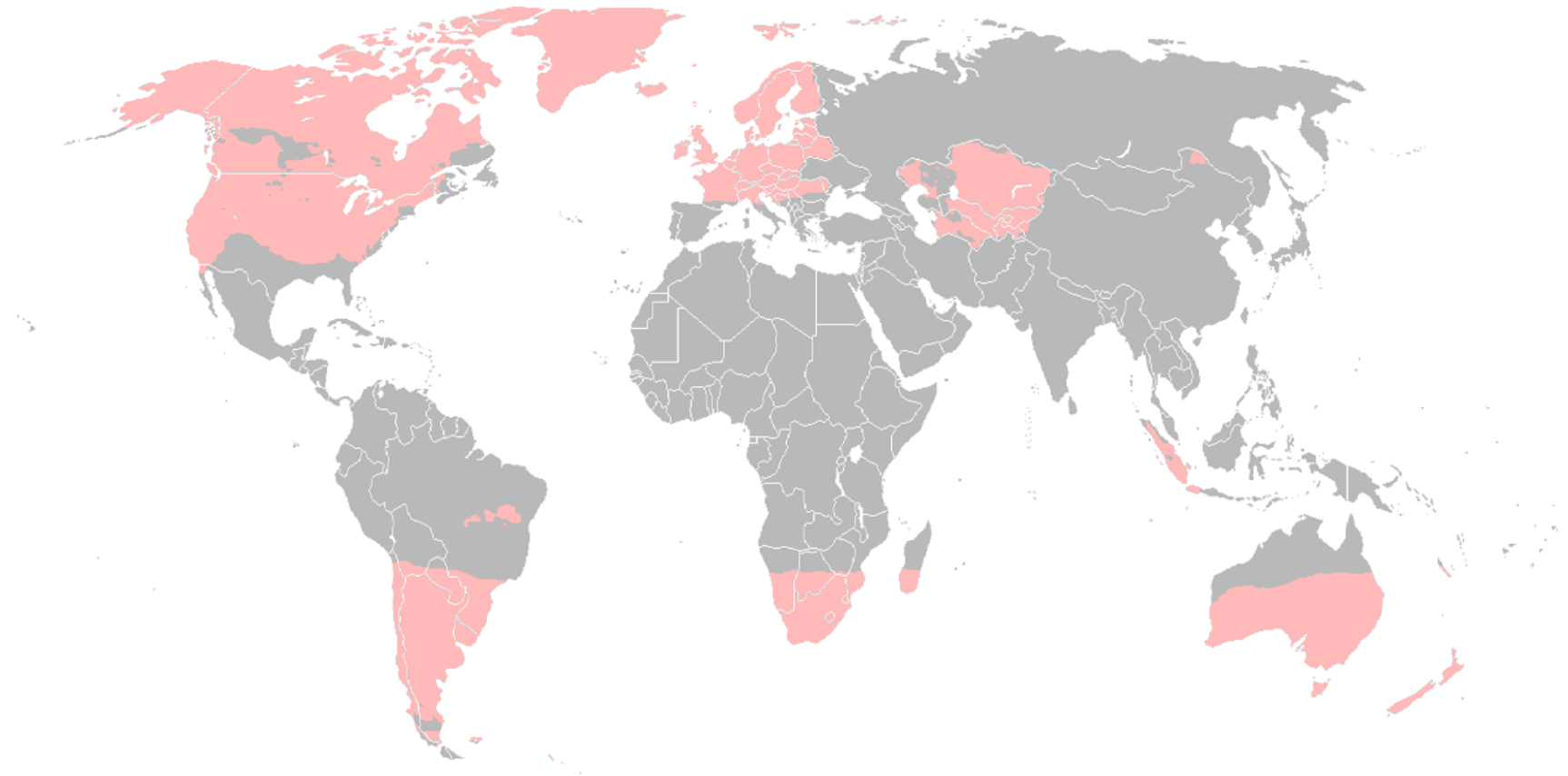


Figura 20: Candidatos para desplegar GS [frecuencia 28 GHz, disponibilidad 99.5% y 90° de ángulo de elevación]

6. Conclusiones y líneas futuras

6.1 Conclusiones

En este trabajo, se ha abordado la necesidad de definir la ubicación de las estaciones terrestres de constelaciones NGSO, llevando a cabo un dimensionamiento del segmento terreno en función de múltiples criterios.

Observando los resultados que se muestran en las tablas y figuras de la sección anterior, llegamos a la conclusión de que en todos los casos de pruebas se sigue el mismo patrón. En concreto, podemos observar que, para todas las frecuencias, los resultados más restrictivos siempre se obtienen cuando la disponibilidad de enlace es del 99% y el ángulo de elevación es de 10° . Mientras que, para todas las frecuencias, los mejores resultados se obtienen con una disponibilidad de enlace del 99.5% y un ángulo de elevación de 90° . Además, en todos los casos, los valores máximos de atenuación se obtienen para un ángulo de elevación de 10° . Esto puede deberse, a qué, como se explicaba en uno de los estudios revisados y comentados en la sección 4, la atenuación es mayor cuanto menor es el ángulo de elevación.

También se puede observar, que los valores de la atenuación por lluvia son mayores según aumenta la frecuencia, tal y como se explicaba en la sección 3.1.1.

Otro aspecto a destacar, son las coordenadas de los candidatos obtenidos. Podemos razonar que la latitud es un factor determinante a la hora de decidir donde desplegar una estación terrestre, puesto que como se puede observar, en ninguno de los casos de pruebas se obtienen candidatos en las latitudes próximas al Ecuador, mientras que, se puede apreciar que las ubicaciones más atractivas se encuentran en la banda de latitud entre 20° y 40° en ambos hemisferios, tal y como concluía una de las investigaciones incluidas en la sección 4. Sin embargo, en cuanto a longitud no podemos definir un patrón común, puesto que encontramos candidatos en todas las zonas del globo, a excepción del este Asia. Sin embargo, este se debe a que muchos países de esta zona no se han tenido en cuenta debido a su situación geopolítica.

En definitiva, realizando un análisis, podemos concluir que los resultados obtenidos en este Trabajo son coherentes y, como se ha mencionado, reafirman algunas de las conclusiones obtenidas por otros autores en sus investigaciones. Además, este trabajo ha extendido el trabajo realizado en TFM previos relacionados con el dimensionamiento de alguna parte del sistema de comunicaciones por satélite como [69][70][71].

6.2 Líneas futuras

Existen grandes retos que deben afrontarse para continuar esta línea de investigación. Uno de estos retos sería el de optimizar la exactitud de los resultados obtenidos mediante la optimización de los umbrales de cada criterio, puesto que estos umbrales. Además, analizando el grado de implicación de cada criterio en los resultados obtenidos, podrían realizarse nuevos casos de prueba ponderando los diferentes criterios, de modo que no todos los criterios tengan la misma influencia.

También se podría ampliar los criterios a tener en cuenta incluyendo, por ejemplo, la distancia entre la GS y el núcleo de la red terrestre, la visibilidad, las limitaciones regulatorias y de espectro de cada país, la demanda de tráfico, etc. Otro criterio para incluir podría ser el número de saltos hasta llegar al GS, puesto que un mayor número de saltos supone un aumento del retardo y la latencia, empeorando así el rendimiento y la calidad del sistema.

Asimismo, podría ampliarse el rango de valores de los parámetros aplicados, incluyendo más bandas de frecuencia, diferentes altitudes de los satélites, diferentes ángulos de elevación, etc.

Otro aspecto a tener en cuenta es la optimización del punto más ideal donde desplegar la GS dentro de las regiones ya obtenidas como candidatas. Por último, para obtener resultados más precisos y de manera más eficiente, se podría aplicar algún algoritmo de optimización como los descritos en la sección 3.2.

También se puede tener en cuenta criterios que tengan que ver con las formas de onda de los enlaces como [66][67][73] o la aplicación para la que se puede emplear los satélites [65][68][72][74]. También en ámbito militar la colocación de gateways estratégicos [76][77].

7. Bibliografía

[1] Sitio web: <https://www.esa.int/>

[2] Sitio web: <https://dle.rae.es/sat%C3%A9lite>

[3] B. G. Evans, P. T. Thompson, G. E. Corazza, A. Vanelli-Coralli and E. A. Candreva, "1945–2010: 65 Years of Satellite History From Early Visions to Latest Missions," in Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 11, pp. 1840-1857, Nov. 2011, doi: 10.1109/JPROC.2011.2159467.

[4] J. Takei and J. Murai, "Satellite communication on the Internet: its history and the technology," 2003 Symposium on Applications and the Internet Workshops, 2003. Proceedings., Orlando, FL, USA, 2003, pp. 3-7, doi: 10.1109/SAINTW.2003.1210116.

[5] J.E. Oberright, "Satellite artificial", World Book Online Reference Center, World Book, Inc, 2004.

[6] O. Kodheli et al., "Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 1, pp. 70-109, Firstquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2020.3028247.

[7] C. -h. Lee, J. -J. Jang, J. Lee, S. -H. Choi, S. Park and J. Kim, "Key Considerations for Communication Satellite System Design," 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2022, pp. 193-194, doi: 10.1109/APCC55198.2022.9943596.

[8] A. Sayedur, "A Critical Analysis of Communication's Satellite (COMSAT)", 2020 COMSATS Institute of Information Technology, Islamabad, Darul Ihsan University, 2020.

[9] Satellite frequency bands

https://www.esa.int/Applications/Telecommunications_Integrated_Applications/Satellite_frequency_bands

[10] El espectro radioeléctrico

http://www.oas.org/en/citel/infocitel/2008/octubre/espectro_e.asp

[11] "Low-Earth Orbit satellites: Spectrum access ", Digital Transform Monitor, European Commission, 2017. https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-06/Low-Earth%20Orbit%20satellites%20-%20Spectrum%20access%20%28v1_0%29.pdf

[12] J. E. Oros, J. Trejo and A. Salcedo, "Identification, Location, and Reception of Low Earth Orbit Satellites (LEO) Signals," 2015 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE), Cuernavaca, Mexico, 2015, pp. 246-250, doi: 10.1109/ICMEAE.2015.25.

- [13] Ukommi, Ubong, Ikpaya, "Ground Station Design for Satellite and Space Technology Development", 2022, American Journal of Engineering Research. 10. 12 - 19.
- [14] M. A. Diaz, J. I. Rojas, C. E. Gonzalez, C. J. Rojas, E. A. Obreque and I. A. Portillo, "Preliminary analysis of the new space communication scenario: the ground segment perspective," 2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON), Resistencia, Argentina, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ARGENCON49523.2020.9505347.
- [15] X. Li, H. Wang, W. Zhao, Q. Tian, Z. Xu and B. Yang, "A new multiple gateway transmit diversity technique for future satellite networks," in China Communications, vol. 19, no. 8, pp. 214-233, Aug. 2022, doi: 10.23919/JCC.2022.08.016.
- [16] Sitio web: https://polaridad.es/vsat-que-es-y-para-que-sirve-una-estacion-terrestre-muy-pequena/?utm_content=cmp-true
- [17] Hernández, D. J. I. (2015) "Diseño y puesta en marcha de un receptor SDR de bajo coste para experimentación en la banda de HF". Universidad de Vigo
- [18] Sitio web: <https://ts2.space/es/redes-de-estaciones-terrestres-basadas-en-cubesat/#gsc.tab=0>
- [19] Sitio web: <https://ts2.space/es/virtualizacion-de-estaciones-terrestres-basadas-en-satelites/#gsc.tab=0>
- [20] Sitio web: <https://axessnet.com/la-inteligencia-artificial-ia-en-los-satelites/>
- [21] Sitio web: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain
- [22] Sitio web: <https://www.intelsat.com/global-network/terrestrial-network/teleport-chart/>
- [23] Sitio web: <https://www.ses.com/es>
- [24] Sitio web: <https://www.eutelsat.com/en/support/technical-support-teleports-resources-tools.html>
- [25] Sitio web: <https://www.globecast.com/about-us/who-we-are/>
- [26] Sitio web: <https://www.hispasat.com/es/flota-de-satelites/centros-de-control>
- [27] Sitio web: <https://axessnet.com/en/home/>
- [28] Sitio web: https://www.mobileworldlive.com/old_spanish/oneweb-anade-regiones-de-europa-y-eeuu-a-su-mapa-de-cobertura/
- [29] Sitio web: <https://www.satelital-movil.com/2019/03/por-primera-vez-iridium-cuenta-con-una.html>
- [30] Sitio web: <https://wifisafe.com/blog/starlink-un-sistema-de-satelites-que-ofrece-acceso-a-internet-de-banda-ancha/>
- [31] Sitio web:
https://es.wikipedia.org/wiki/Optimizaci%C3%B3n_por_enjambre_de_part%C3%ADculas

- [32] Autor Conogasi. (2018). Algoritmos genéticos. Conogasi.org Sitio web: <https://conogasi.org/articulos/algoritmos-geneticos/>
- [33] Sitio web: https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_de_recocido_simulado
- [34] Sitio web: <https://medium.com/estudio-de-datos/algoritmo-de-recocido-simulado-o-simulated-annealing-234f567677d9>
- [35] Y. Cao, Y. Shi, J. Liu, and K. Nei, "Optimal satellite gateway placement in space-ground integrated network for latency minimization with reliability guarantee," *IEEE Wireless Communications Letters*, pp. 1–1, 2017.
- [36] Y. Cao, H. Guo, J. Liu, and K. Nei, "Optimal satellite gateway placement in space-ground integrated networks," *IEEE Network*, vol. 32, no. 5, pp. 32–37, 2018.
- [37] Q. Chen, L. Yang, J. Guo, X. Liu and X. Chen, "Optimal Gateway Placement for Minimizing Intersatellite Link Usage in LEO Megaconstellation Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 22, pp. 22682-22694, 15 Nov.15, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3182412.
- [38] C. Xiong, X. Chen, F. Peng and L. Wang, "Optimal Gateway Station Placement for Transmission Delay Minimization in Broadband LEO Satellite Communication System," 2021 8th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA), Yinchuan, China, 2021, pp. 120-127, doi: 10.1109/DSA52907.2021.00021.
- [39] C. Zhu, Y. Li, M. Zhang, Q. Wang and W. Zhou, "An Optimization Method for the Gateway Station Deployment in LEO Satellite Systems," 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128413.
- [40] J. Guo, D. Rincón, S. Sallent, L. Yang, X. Chen and X. Chen, "Gateway Placement Optimization in LEO Satellite Networks Based on Traffic Estimation," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 4, pp. 3860-3876, April 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3065994.
- [41] D. Zhou, M. Sheng, J. Wu, J. Li and Z. Han, "Gateway Placement in Integrated Satellite–Terrestrial Networks: Supporting Communications and Internet of Remote Things," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 6, pp. 4421-4434, 15 March15, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3103965.
- [42] L. Cheng et al., "Study on Gateway Station Deployment for Large Scale LEO Satellite Constellation Networks," 2022 IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom), Wuhan, China, 2022, pp. 1540-1544, doi: 10.1109/TrustCom56396.2022.00220.

- [43] I. del Portillo, M. Sanchez, B. Cameron and E. Crawley, "Optimal location of optical ground stations to serve LEO spacecraft," 2017 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2017, pp. 1-16, doi: 10.1109/AERO.2017.7943631.
- [44] N. K. Lyras, C. N. Efrem, C. I. Kourogiorgas, A. D. Panagopoulos and P. . -D. Arapoglou, "Optimizing the Ground Network of Optical MEO Satellite Communication Systems," in IEEE Systems Journal, vol. 14, no. 3, pp. 3968-3976, Sept. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2019.2945838.
- [45] L. Shen et al., "Network Evaluation and Planning for Large-scale Low Earth Orbit Satellite Constellation Networks," 2020 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (ISPA/BDCloud/SocialCom/SustainCom), Exeter, United Kingdom, 2020, pp. 1235-1240, doi: 10.1109/ISPA-BDCloud-SocialCom-SustainCom51426.2020.00183.
- [46] A. Modiri, L. Mohammady and N. Molanian, "Less Faulty and Simpler Statistical Prediction of Sun-Synchronous Polar LEO Satellite Visions for Ground Stations," 2008 Fourth Advanced International Conference on Telecommunications, Athens, Greece, 2008, pp. 386-391, doi: 10.1109/AICT.2008.23.
- [47] A. Modiri and L. Mohammady, "Mathematical Prediction of Sun-Synchronous Polar LEO Satellite Visions for Earth Stations," 2008 10th International Conference on Advanced Communication Technology, Gangwon, Korea (South), 2008, pp. 1559-1563, doi: 10.1109/ICACT.2008.4494077.
- [48] L. mohammadi, N. molanian and A. heidari, "Determination of the Best Coverage Area for Receiver Stations of LEO Remote Sensing Satellites," 2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, Damascus, Syria, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTTA.2008.4530157.
- [49] S. Cakaj, B. Kamo, A. Lala and A. Rakipi, "Elevation impact on signal to spectral noise density ratio for Low Earth Orbiting satellite ground station at S-band," 2014 Science and Information Conference, London, UK, 2014, pp. 641-645, doi: 10.1109/SAI.2014.6918255.
- [50] I. del Portillo, B. Cameron and E. Crawley, "Ground segment architectures for large LEO constellations with feeder links in EHF-bands," 2018 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2018, pp. 1-14, doi: 10.1109/AERO.2018.8396576.
- [51] C. N. Efrem and A. D. Panagopoulos, "Globally Optimal Selection of Ground Stations in Satellite Systems With Site Diversity," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 7, pp. 1101-1104, July 2020, doi: 10.1109/LWC.2020.2982139.

- [52] V. M. Baeza, F. Ortiz, E. Lagunas, T. S. Abdu and S. Chatzinotas, "Multi-Criteria Ground Segment Dimensioning for Non-Geostationary Satellite Constellations," 2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Gothenburg, Sweden, 2023, pp. 252-257, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188237.
- [53] V. M. Baeza, F. Ortiz, E. Lagunas, T. S. Abdu and S. Chatzinotas, "Gateway Station Geographical Planning for Emerging Non-Geostationary Satellites Constellations," in IEEE Network, doi: 10.1109/MNET.2023.3321531.for Security Reliability and Trust (SnT), University of Luxembourg, Luxembourg, 2023.
- [54] V. M. Baeza, E. Lagunas, H. Al-Hraishawi and S. Chatzinotas, "An Overview of Channel Models for NGSO Satellites," 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), London, United Kingdom, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012693.
- [55] Hongyi Liang and V. C. M. Leung, "Geographical distribution of gateways to support satellite diversity in CDMA LEO mobile satellite systems," Proceedings of ICUPC - 5th International Conference on Universal Personal Communications, Cambridge, MA, USA, 1996, pp. 925-929 vol.2, doi: 10.1109/ICUPC.1996.562713.
- [56] Y. Vasavada, D. Arur, C. Ravishankar and C. Barnett, "User location determination using delay and Doppler measurements in LEO satellite systems," MILCOM 2017 - 2017 IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Baltimore, MD, USA, 2017, pp. 325-330, doi: 10.1109/MILCOM.2017.8170797.
- [57] M. Stolarski, "Tracking quality measurements of Ground Station for Low Earth Orbit satellite," 2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON), Gdansk, Poland, 2014, pp. 1-3, doi: 10.1109/MIKON.2014.6900010.
- [58] L. A. R. Silva Mello, M. S. Pontes and R. S. L. Souza, "Rain attenuation prediction for the design of site-diversity LEO/SMS Gateway configuration in the tropics," 1997 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. 'Linking to the Next Century'. Proceedings, Natal, Brazil, 1997, pp. 729-733 vol.2, doi: 10.1109/SBMOMO.1997.648878.
- [59] W. Liu, Y. Tao and L. Liu, "Load-Balancing Routing Algorithm Based on Segment Routing for Traffic Return in LEO Satellite Networks," in IEEE Access, vol. 7, pp. 112044-112053, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2934932.

- [60] D. G. Michelson and Weiwen Liu, "Simulation of rain fading and scintillation on Ka-band Earth-LEO satellite links," 2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, St. John's, NL, Canada, 2009, pp. 635-640, doi: 10.1109/CCECE.2009.5090206.
- [61] T. Ahmed et al., "Satellite Gateway Diversity in SDN/NFV-enabled satellite ground segment systems," 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Paris, France, 2017, pp. 882-887, doi: 10.1109/ICCW.2017.7962770.
- [62] S. Tani, K. Motoyoshi, H. Sano, A. Okamura, H. Nishiyama and N. Kato, "An adaptive beam control technique for diversity gain maximization in LEO satellite to ground transmissions," 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICC.2016.7510942.
- [63] Orduy, J. "PROCESSO DE REFERÊNCIA PARA O DESENVOLVIMENTO DA ARQUITETURA DE UMA ESTAÇÃO TERRENA PARA PICO E NANOSATÉLITES". Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tesis de maestria. Pag. 1. 2016
- [64] Sitio web: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-13-201712-S!!PDF-S.pdf
- [65] Monzon Baeza, V.; Alvarez Marban, M. High Altitude Platform Stations Aided Cloud-Computing Solution for Rural-Environment IoT Applications. Comput. Netw. Commun. 2023, 1, 85–98.
- [66] V. M. Baeza y A. G. Armada, "Noncoherent Massive MIMO," en Wiley 5G Ref: The Essential 5G Reference Online, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019, pp. 1-28. doi: 10.1002/9781119471509.w5GRef027
- [67] V. M. Baeza and A. G. Armada, "Performance and Complexity Tradeoffs of Several Constellations for Non Coherent Massive MIMO," 2019 22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Lisbon, Portugal, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/WPMC48795.2019.9096091.
- [68] V. M. Baeza, V. N. Ha, J. Querol and S. Chatzinotas, "Non-coherent massive MIMO integration in satellite communication," 39th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2022), Stresa, Italy, 2022, pp. 200-205, doi: 10.1049/icp.2023.1386.
- [69] M. Jove Flórez y V. M. Baeza, "Análisis de métodos para protección del enlace Feeder en comunicaciones por satélite," 2023.
- [70] Espinosa Giralt, N. (2023). Análisis de modelos de atenuación por lluvia en enlaces terrestres aplicados a enlaces espaciales.

- [71] Camuñas Galán, E. (2022). Avances de MIMO masivo para comunicaciones por satélite y análisis con GMAT.
- [72] Parada, R.; Monzon Baeza, V.; Barraca-Ibort, D.N.; Monzo, C. LoRa-Based Low-Cost Nanosatellite for Emerging Communication Networks in Complex Scenarios. *Aerospace* 2023, 10, 754. <https://doi.org/10.3390/aerospace10090754>
- [73] V. M. Baeza, "Multiuser non coherent massive mimo schemes based on dpsk for future communication systems," Tesis doct., Universidad Carlos III de Madrid, 2019.
- [74] V. M. Baeza, "Multiple Access in Constellation Domain by Non-Coherent Massive MIMO," 2023, arXiv preprint arXiv:2303.06499. doi: 10.48550/arXiv.2303.06499.
- [75] V. M. Baeza, A. G. Armada, W. Zhang, M. El-Hajjar and L. Hanzo, "A Noncoherent Multiuser Large-Scale SIMO System Relying on M-Ary DPSK and BICM-ID," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 1809-1814, Feb. 2018, doi: 10.1109/TVT.2017.2750114
- [76] Concha Salor, L.; Monzon Baeza, V. Harnessing the Potential of Emerging Technologies to Break down Barriers in Tactical Communications. *Telecom* 2023, 4, 709-731. <https://doi.org/10.3390/telecom4040032>
- [77] V. M. Baeza and L. C. Salor, "New horizons in tactical communications: An overview of emerging technologies possibilities," in *IEEE Potentials*, vol. 43, no. 1, pp. 12-19, Jan.-Feb. 2024, doi: 10.1109/MPOT.2023.3297326.