



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**Diseño de una red satelital de telecomunicaciones con tecnología vsat
para la parroquia Columbe del cantón Colta**

Trabajo de Titulación para optar al título de:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

Autor:

Yandun Espinosa Robert Mikel

Tutor:

Mgs. José Luis Jinez Tapia

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **ROBERT MIKEL YANDUN ESPINOSA**, con cédula de ciudadanía **150090093-9**, autor del trabajo de investigación titulado **DISEÑO DE UNA RED SATELITAL DE TELECOMUNICACIONES CON TECNOLOGÍA VSAT PARA LA PARROQUIA COLUMBE DEL CANTÓN COLTA**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autora de la obra referida será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 29 de octubre de 2024.



Robert Mikel Yandun Espinosa
C.I: 150090093-9

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

En la Ciudad de Riobamba, a los 30 días del mes de OCTUBRE de 2024, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **ROBERT MIKEL YANDUN ESPINOSA** con CC: **150090093-9**, de la carrera de **INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **DISEÑO DE UNA RED SATELITAL DE TELECOMUNICACIONES CON TECNOLOGÍA VSAT PARA LA PARROQUIA COLUMBE DEL CANTÓN COLTA**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



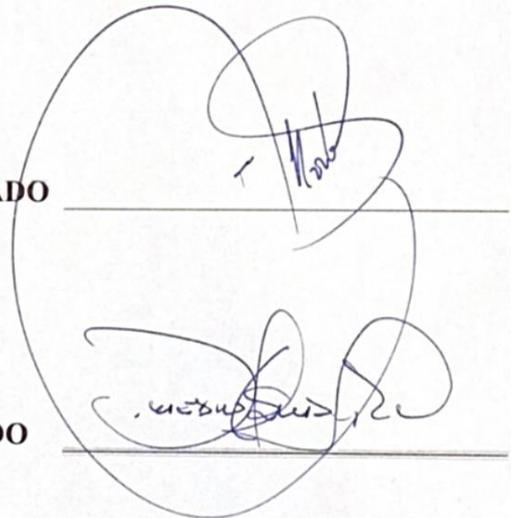
Mgs. José Luis Jinez Tapia
TUTOR(A)

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

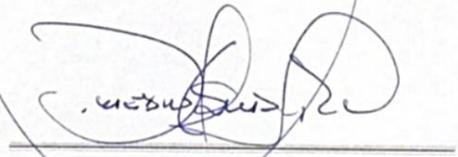
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**DISEÑO DE UNA RED SATELITAL DE TELECOMUNICACIONES CON TECNOLOGÍA VSAT PARA LA PARROQUIA COLUMBE DEL CANTÓN COLTA**”, presentado por **ROBERT MIKEL YANDUN ESPINOSA**, con cédula de identidad número **150090093-9**, bajo la tutoría de Mgs. José Luis Jinez Tapia; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 28 de noviembre de 2024.

PhD. Marlon Basantes
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

A large, stylized handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line. The signature is highly cursive and loops around itself.

PhD. Fernando Escudero
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line. The signature is cursive and includes some illegible text.

PhD. Luis Tello
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line. The signature is cursive and clearly legible as 'Luis P. Tello'.

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

CERTIFICACIÓN

Que, **ROBERT MIKEL YANDUN ESPINOSA** con CC: **150090093-9**, estudiante de la Carrera de **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **“DISEÑO DE UNA RED SATELITAL DE TELECOMUNICACIONES CON TECNOLOGÍA VSAT PARA LA PARROQUIA COLUMBE DEL CANTÓN COLTA”**, cumple con el **9%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 25 de noviembre de 2024



Mgs. José Luis Jinez Tapia
TUTOR(A)

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESÚMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	15
1.1.1 Planteamiento del Problema	15
1.1.2 Justificación.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo General.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
CAPÍTULO II.....	17
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Comunicación.....	17
2.1.1 Comunicación Satelital.....	17
2.1.2 Beneficios de las Comunicaciones Satelitales.....	18
2.2 Componentes de una Red Satelital.....	18
2.2.1 Transponder	18
2.2.2 Estaciones Terrenas	18
2.3 Sistemas Satelitales	19
2.4 Tipos de Satélite	19

2.4.1	Satélite Natural	19
2.4.2	Satélite Artificial.....	20
2.5	Órbitas Satelitales.....	20
2.5.1	Satélites Geoestacionarios (GEO)	20
2.5.2	Satélites de Órbita Media (MEO).....	20
2.5.3	Satélites de Órbita Baja (LEO).....	21
2.6	Redes VSAT.....	21
2.7	Bandas de Frecuencia Satelitales y Cobertura	23
2.8	Satélites Autorizados para Operar en Ecuador por la ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones)	23
2.9	Efectos de la Atmosfera Terrestre en Comunicaciones Satelitales	26
2.10	Transmisión de Datos DBS – S (Direct Broadcast Satellite – Satellite).....	27
2.11	Proyectos Piloto de HISPASAT Mediante Comunicaciones Satelitales en Ecuador.....	28
2.12	Aplicaciones.....	28
2.12.1	Aplicaciones Unidireccionales	29
2.12.2	Aplicaciones Bidireccionales	29
CAPÍTULO III		30
3.	METODOLOGÍA.....	30
3.1	Tipo de Investigación	30
3.2	Método de Investigación	30
3.2.1	Investigación exploratoria	30
3.2.2	Investigación descriptiva	30
3.2.3	Investigación experimental.....	30
3.3	Procedimiento y Análisis	31
3.3.1	Fase I: Recolección, análisis y selección de la información bibliográfica	31
3.3.2	Fase II: Diseño.....	31
3.3.3	Fase III: Simulación.....	32

3.3.4	Fase IV: Análisis Técnico – Económico	32
3.4	Población de Estudio y Tamaño de la Muestra	32
3.4.1	Población de Estudio	32
3.4.2	Tamaño de la Muestra	32
3.5	Operacionalización de Variables.....	33
3.6	Diseño de la Red Satelital VSAT.....	33
3.6.1	Topología.....	33
3.6.2	Frecuencia de Trabajo	34
3.6.3	Tráfico	34
3.6.4	Modulación.....	34
3.6.5	Satélite	34
3.7	Factores a Considerar para el Diseño.....	35
3.7.1	Pérdidas Atmosféricas	35
3.7.2	Efectos de la Lluvia	36
3.7.3	Pérdidas de Seguimiento	37
3.7.4	Ganancia de la Antena.....	38
3.7.5	Relación Portadora a Ruido C/N.....	38
3.7.6	Relación Energía de Bit a Densidad de Ruido Eb/No	39
3.8	Presupuesto de Enlace.....	40
3.8.1	Presupuesto de Enlace de Subida (Uplink).....	40
3.8.2	Presupuesto de Enlace de Bajada (downlink).....	42
3.9	Diseño de la Red Interna	46
3.9.1	Unidad Externa (ODU).....	47
3.9.2	Unidad Interna (IDU)	49
3.9.3	Punto de Acceso (Router Wifi)	50
3.10	Ancho de Banda de la Red	51
CAPÍTULO IV		52

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
4.1	Generación y Visualización del Escenario.....	52
4.2	Análisis del Presupuesto de Enlace.....	52
4.3	Análisis Técnico – Económico.....	55
4.4	Rendimiento de la Red	56
4.4.1	Prueba de Normalidad	57
4.4.2	Prueba de Wilcoxon.....	57
4.4.3	Diagrama de cajas.....	58
4.4.4	Estudio de Correlación	60
4.4.5	Prueba U de Mann-Whitney	61
4.4.6	Porcentajes de Mejora	64
	CAPÍTULO V.....	65
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
5.1	CONCLUSIONES	65
5.2	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA	66
	ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diferencias entre satélites de diferentes órbitas.	21
Tabla 2: Bandas de frecuencia.....	23
Tabla 3: Satélites habilitados por la ARCOTEL para operar en Ecuador	24
Tabla 4: Variable independiente y dependiente.	33
Tabla 5: Características técnicas del Amazonas 5	35
Tabla 6: Valores de atenuación atmosférica.....	36
Tabla 7: Coeficientes de regresión para estimar el valor de la atenuación específica.....	36
Tabla 8: Zonas hidrometeorológicas e intensidad de lluvia en (mm/h)	37
Tabla 9: Pérdidas por seguimiento típicos.....	37
Tabla 10: Comparación de valores de las modulaciones con BER 10 – 6.....	40
Tabla 11: Valores para en presupuesto de enlace uplink.....	40
Tabla 12: Valores para en presupuesto de enlace downlink.....	42
Tabla 13: Características técnicas de la antena	47
Tabla 14: Características técnicas del LNB.....	48
Tabla 15: Características técnicas módem satelital.	49
Tabla 16: Ancho de banda promedio por usuario.....	51
Tabla 17: Resultados del presupuesto de enlace calculados.....	53
Tabla 18: Resultados del presupuesto de enlace con Satellite Link Budget Analyzer.	53
Tabla 19: Costos de equipos e implementación de la red satelital VSAT.....	55
Tabla 20: Pruebas de normalidad con el test de Shapiro-Wilk.....	57
Tabla 21: Prueba de Wilcoxon.	58
Tabla 22: Correlación de Spearman antes.	60
Tabla 23: Correlación de Spearman después.....	61
Tabla 24: Prueba U de Mann-Whitney.....	62
Tabla 25: Porcentajes de mejora.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de órbitas.....	20
Figura 2: Red satelital VSAT.	22
Figura 3: Modelo metodológico.	31
Figura 4: Topología de red VSAT.....	33
Figura 5: Área de cobertura del Amazonas 5 con valores de EIRP (dBW).	35
Figura 6: Zonas climatológicas de Intensidad de lluvia en América del Sur.	37
Figura 7: Relación entre ganancia y diámetro de una antena.	38
Figura 8: Relación C/N vs BER	39
Figura 9: Relación Eb/No vs BER.....	39
Figura 10: Diagrama de la red interna.	47
Figura 11:Antena Norsat WAYFARER™ de 1,2 m	47
Figura 12: LNB.....	48
Figura 13: Módem satelital VSAT	49
Figura 14: Router Wifi	50
Figura 15:Desplazamiento orbital del satélite.	52
Figura 16: Margen de enlace de subida (uplink) L1.....	54
Figura 17: Margen de enlace de bajada (downlink) L2.....	55
Figura 18: Escenario de simulación para probar el rendimiento de la red.	56
Figura 19: Diagrama de cajas de rapidez de carga en Mbps.	58
Figura 20: Diagrama de cajas de rapidez de descarga en Mbps.....	59
Figura 21: Diagrama de cajas de latencia en ms.	59
Figura 22: Diagrama de cajas de tasa de error en %.	59
Figura 23: Barras apiladas de rapidez de carga.	62
Figura 24: Barras apiladas de rapidez de descarga.....	63
Figura 25: Barras apiladas de latencia.....	63
Figura 26: Barras apiladas de tasa de error.....	64

RESUMEN

El presente proyecto propone el diseño de una red satelital de telecomunicaciones con tecnología VSAT, como una solución alternativa para proporcionar acceso a internet en sectores aislados sin cobertura de redes de telecomunicaciones convencionales, como la parroquia Columbe, en el cantón Colta. Se ha seleccionado una configuración de red punto-multipunto en banda Ku, optimizada para reducir costos y asegurar estabilidad frente a condiciones climáticas adversas. Se incluye una descripción detallada de los elementos (IDU, ODU) que conforman la red VSAT, desde las arquitecturas, bandas de frecuencias, protocolos de acceso múltiple y sus aplicaciones actuales. También se analizan las características, ventajas y desventajas de las comunicaciones por satélite y los componentes del sistema VSAT. Se lleva a cabo un análisis matemático del enlace de radiofrecuencia entre el satélite y la estación terrena, tomando en cuenta los parámetros principales (pérdidas atmosféricas, efectos de la lluvia, pérdidas de seguimiento, ganancia de la antena, relación portadora a ruido y relación energía de bit a densidad de ruido), que influyen en el rendimiento de la red. Se detalla el proceso para calcular el ancho de banda necesario para una red satelital VSAT, utilizando las herramientas "Satellite Communications Toolbox" y "Satellite Link Budget Analyzer" de Matlab para validar los cálculos realizados del presupuesto de potencia del enlace de subida y del enlace de bajada, siendo este análisis necesario para demostrar que el diseño cumple con los requisitos de calidad de servicio en términos de rapidez de carga y descarga, latencia, tasa de error y estabilidad, garantizando una conexión confiable para la comunidad. Los resultados obtenidos mediante simulaciones realizadas en Matlab y GNS3 validaron el diseño, optimizando parámetros clave como la relación portadora a ruido (C/N) y relación energía de bit a densidad de ruido (Eb/No). Lo que garantiza un buen desempeño de la red, con mejoras significativas en la rapidez de carga (43,16%), rapidez de descarga (45,28%), latencia (21,76%) y una reducción en la tasa de errores (21,19%) en comparación con la conexión actual disponible en Columbe.

Palabras clave: VSAT, red satelital, telecomunicaciones, satélite, Matlab, GNS3, enlace de radiofrecuencia.

ABSTRACT

This project proposes the design of a satellite telecommunications network using VSAT technology as an alternative solution to provide internet access in remote areas without coverage from conventional telecommunications networks, such as the Columbe parish in the Colta canton. A point-to-multipoint network configuration in the Ku band has been selected, optimized to reduce costs and ensure stability in the face of adverse weather conditions. A detailed description of the elements (IDU, ODU) that make up the VSAT network is included, covering architectures, frequency bands, multiple access protocols, and their current applications. The characteristics, advantages, and disadvantages of satellite communications and the components of the VSAT system are also analyzed. A mathematical analysis of the radiofrequency link between the satellite and the ground station is conducted, taking into account the main parameters (atmospheric losses, rain effects, tracking losses, antenna gain, carrier-to-noise ratio, and bit energy-to-noise density ratio) that influence the network's performance. The process for calculating the required bandwidth for a VSAT satellite network is detailed, using Matlab's "Satellite Communications Toolbox" and "Satellite Link Budget Analyzer" tools to validate the calculations of the uplink and downlink power budget. This analysis is essential to demonstrate that the design meets the quality-of-service requirements in terms of upload and download speed, latency, error rate, and stability, ensuring a reliable connection for the community. The results obtained from simulations conducted in Matlab and GNS3 validated the design, optimizing key parameters such as the carrier-to-noise ratio (C/N) and bit energy-to-noise density ratio (Eb/No). This ensures good network performance, with significant improvements in upload speed (43.16%), download speed (45.28%), latency (21.76%), and a reduction in the error rate (21.19%) compared to the current connection available in Columbe.

Keywords: VSAT, satellite network, telecommunications, satellite, Matlab, GNS3, radiofrequency link.



Escudero Edison Damiano per:
EDISON RAMIRO
DAMIAN ESCUDERO

Reviewed by:
MsC. Edison Damian Escudero
ENGLISH PROFESSOR
C.C.0601890593

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a los avances tecnológicos, a la globalización de las telecomunicaciones y a la necesidad de comunicación de las poblaciones [1], se piensa en una alternativa para lograr un acercamiento entre las comunidades aisladas de las áreas urbanas de la provincia de Chimborazo, ya que no pueden ser atendidos por las redes regionales de cobre y de fibra óptica.

En Ecuador y particularmente en la provincia de Chimborazo existen muchos sectores rurales en los cuales no tienen acceso a todos los servicios de telecomunicaciones, entonces uno de los principales retos ha sido la perfecta comunicación y el control de ciertos recursos a distancia [2]. Esta situación ha sido resuelta ya en varios países con la utilización de soluciones de telecomunicaciones vía satélite [3]. Entendiendo por satélite como un repetidor radioeléctrico ubicado en el espacio, que recibe señales generadas en la tierra, las amplifica y las vuelve a enviar a la tierra, ya sea al mismo punto donde se originó la señal u otro punto distinto [4].

La comunicación satelital se ha vuelto una herramienta necesaria para poder llegar a zonas geográficamente aisladas de centrales que brindan servicios de telecomunicaciones, con el sistema de los satélites se ha podido llegar a lugares polares que es imposible con transmisores terrestres debido a la zona geográfica. En 1964 fue lograda la primera transmisión satelital con éxito, esto generó que se desarrollaran nuevos avances que permitieron la creación de diversos sistemas de telecomunicaciones en todo el mundo como la tecnología VSAT. Las redes VSAT (Terminal de apertura muy pequeña) son redes de telecomunicaciones de datos vía satélite para intercambio de información punto - punto o, punto-multipunto (broadcasting) o interactiva, utilizando antenas de pequeñas dimensiones que brindan servicios por un enlace satelital geostacionario [5] y que hace parte de la gran red de telecomunicaciones del mundo que cada día va tomando mayor importancia y se proyecta como una alternativa para el establecimiento de las comunicaciones en sitios apartados y de difícil acceso [3].

Actualmente en Ecuador se emplean redes VSAT (Terminal de apertura muy pequeña) en las bandas C y Ku para brindar servicios de internet satelital, siendo común la instalación de terminales remotas en zonas rurales [6]. Entre los proveedores de internet satelital, se encuentran Punto Net y la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT EP.

Punto Net se destaca como uno de los pioneros en el campo del internet satelital, ya que dispone de un hub satelital VSAT de última generación, dos estaciones terrenales y personal técnico especializado. Así mismo, CNT EP también forma parte de los proveedores líderes en este campo, contando con dos redes VSAT [7]:

- Red HUGHES VSAT, consta de una estación HUB, un circuito RF, una antena principal y terminales satelitales VSAT en banda Ku, equipadas con antenas remotas de 1,2 m y 1,8 m de diámetro. Actualmente, TELESAT tiene un contrato para la banda satelital de 36 MHz [8].

- La red VSAT SKY EDGE II, ofrece una cobertura de Internet y telefonía a través de canales satelitales en banda C, con varias velocidades para estaciones remotas que utilizan antenas receptoras de 1,8 m y 2,4 m de diámetro.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

1.1.1 Planteamiento del Problema

En la actualidad, las telecomunicaciones juegan un papel fundamental en el desarrollo socioeconómico y la conectividad de las comunidades, permitiendo el acceso a información, servicios y oportunidades a nivel local y global. Sin embargo, en muchas zonas rurales y remotas, como la parroquia Columbe en el cantón Colta, la falta de infraestructura de telecomunicaciones adecuada ha generado un aislamiento digital significativo que limita el crecimiento y la participación de la comunidad en la sociedad moderna.

La Parroquia Columbe se caracteriza por su topografía montañosa y su ubicación geográfica alejada de los centros urbanos, lo que ha generado desafíos considerables para la implementación de infraestructura de telecomunicaciones convencionales, como cables de fibra óptica o torres de telefonía celular. Esto ha resultado en una carencia de servicios de comunicación confiables y de alta velocidad, afectando la calidad de vida de los habitantes y la posibilidad de acceso a oportunidades educativas, de salud, comerciales y gubernamentales.

Ante esta problemática, surge la necesidad de diseñar una red satelital de telecomunicaciones con tecnología VSAT específicamente adaptada a las condiciones geográficas y socioeconómicas de la parroquia Columbe. La tecnología VSAT ofrece la posibilidad de establecer conexiones de alta velocidad a través de satélites de comunicación, superando las barreras impuestas por la geografía accidentada y permitiendo el acceso a servicios de internet, telefonía y transmisión de datos [3].

1.1.2 Justificación

La falta de cobertura de las redes de telecomunicaciones en sectores rurales del Ecuador, como en este caso es la parroquia de Columbe del cantón Colta, que dificulta la comunicación entre los usuarios que habitan en dicho sector experimentando una falta de conectividad adecuada debido a su ubicación geográfica remota. La implementación de una red satelital VSAT permitiría superar las limitaciones de infraestructura terrestre y brindar acceso a servicios de telecomunicaciones confiables y de alta velocidad.

La conectividad a través de la red satelital abriría oportunidades para el desarrollo socioeconómico de la parroquia. Facilitaría el acceso a información, educación en línea, telemedicina, comercio electrónico y servicios gubernamentales, lo que impulsaría el crecimiento de la comunidad.

La red satelital ofrecería una comunicación más confiable y menos susceptible a interrupciones debido a factores climáticos o problemas de infraestructura lo que hace que este tipo de redes sean adecuadas para las aplicaciones que requieren transferencias de

información en tiempo real o para conexiones de alta demanda que actualmente es indispensable para todos [5].

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- Diseñar una red satelital de telecomunicaciones con tecnología VSAT para la parroquia Columbe del cantón Colta.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio de la situación actual de los posibles usuarios de la parroquia Columbe según las demandas actuales de telecomunicaciones.
- Realizar un diseño de red satelital con tecnología VSAT considerando aspectos técnicos, de seguridad y escalabilidad.
- Evaluar el funcionamiento del diseño de red mediante simulaciones con el software Matlab, asegurando que se cumplan todos los requisitos de desempeño y rendimiento.
- Determinar la viabilidad de implementación de la red satelital mediante un análisis técnico – económico.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presenta el marco teórico que respalda la investigación, centrándose en los aspectos fundamentales relacionados con las comunicaciones satelitales y la tecnología VSAT. Se exploran en detalle los componentes y el funcionamiento de los sistemas satelitales, las distintas topologías de red y las bandas de frecuencia utilizadas. Asimismo, se describen los pasos clave en el diseño de una red VSAT, incluyendo el análisis de requisitos, el dimensionamiento del enlace, las aplicaciones y los beneficios de estas redes.

2.1 Comunicación

La palabra comunicación se deriva del latín “communicare” que significa compartir algo, por lo tanto, se puede decir que es la acción consciente de intercambiar información entre dos o más participantes con el fin de transmitir o recibir información u opiniones distintas [9].

Para que sea posible la comunicación es necesario la presencia de una serie de elementos que constituyen un esquema cerrado en el que todos ellos son imprescindibles:

- **Emisor:** Es la persona que envía un mensaje con el propósito de informar o comunicar sobre un tema específico.
- **Mensaje:** Es la información o datos que el emisor transmite al receptor. Para que la comunicación sea efectiva, el receptor debe entender este contenido.
- **Canal:** Es el medio por el cual se envía el mensaje, como el teléfono, un documento, o el aire. El canal puede influir en la forma del mensaje, ya que la comunicación varía si se realiza por teléfono, correo electrónico o en persona.
- **Código:** Conjunto de datos y reglas que son compartidos por el emisor y el receptor para permitir y comprender el mensaje adecuadamente.
- **Receptor:** Es la persona que recibe y procesa la información enviada por el emisor.

2.1.1 Comunicación Satelital

La comunicación satelital es un avanzado método de transmisión de información que emplea satélites artificiales en órbita alrededor de la Tierra. Estos satélites, que pueden ser de diversos tipos como científicos, meteorológicos, de navegación o militares, actúan como repetidores suspendidos en el cielo. Reciben señales analógicas y digitales, generalmente en frecuencias de radio específicas y en el rango de los GHz, desde una estación terrena transmisora, amplifican estas señales y las retransmiten a una o múltiples estaciones terrenas receptoras, incluso a grandes distancias y en zonas de difícil acceso. La utilización de microondas y frecuencias de radio de alta direccionalidad permite una cobertura precisa y una alta inmunidad a interferencias, facilitando así la transmisión efectiva de datos, voz y video a nivel global. Desde la primera transmisión de televisión vía satélite en 1964, esta

tecnología ha sido crucial para conectar áreas remotas y mejorar las comunicaciones en todo el mundo [5].

2.1.2 Beneficios de las Comunicaciones Satelitales

- **Cobertura Global:** Los satélites proporcionan comunicación en cualquier lugar del planeta, incluyendo áreas remotas e inaccesibles donde las infraestructuras terrestres no llegan o no son rentables.
- **Confiabilidad:** Estas comunicaciones son menos vulnerables a desastres naturales, como terremotos e inundaciones, que pueden afectar las infraestructuras terrestres, convirtiéndolas en una opción confiable para situaciones críticas y de emergencia.
- **Continuidad:** Operativo las 24 horas del día, los 7 días de la semana durante todo el año, salvo en caso de alguna falla física o lógica que provoque la suspensión del servicio.
- **Movilidad:** Las comunicaciones satelitales facilitan la conectividad en movimiento, esencial para aviones, barcos y vehículos, asegurando que permanezcan conectados sin importar su ubicación.
- **Despliegue rápido:** La infraestructura satelital puede instalarse rápidamente en comparación con las infraestructuras terrestres, lo cual es beneficioso en situaciones de emergencia o en nuevas áreas de desarrollo.
- **Seguridad:** Las comunicaciones satelitales son más seguras gracias a la encriptación avanzada y las tecnologías de protección contra interferencias, adecuadas para aplicaciones militares y de defensa.
- **Escalabilidad:** Facilitan la conexión de redes en diferentes continentes, permitiendo un rápido crecimiento de las redes de comunicaciones gracias a su gran ancho de banda.
- **Redundancia:** Actúan como un sistema de respaldo para las redes terrestres, asegurando la continuidad de las comunicaciones en caso de fallos en la infraestructura terrestre.

2.2 Componentes de una Red Satelital

2.2.1 Transponder

Es un dispositivo electrónico crucial en los satélites de comunicaciones, encargado de recibir señales de una estación terrestre, procesarlas, amplificarlas y cambiarles la frecuencia para evitar interferencias, antes de retransmitirlas de vuelta a la Tierra. Usualmente, un transponder posee un ancho de banda de 36 MHz y desempeña funciones esenciales en la infraestructura de los sistemas de comunicaciones satelitales [10].

2.2.2 Estaciones Terrenas

Las estaciones terrenas son instalaciones que cuentan con los equipos necesarios para comunicarse con satélites en órbita. Su función principal es actuar como un enlace entre el

satélite y las redes terrestres, procesando las señales recibidas del satélite y convirtiéndolas en formatos que pueden ser utilizados por redes de telefonía, internet y televisión. Además de transmitir y recibir datos, estas estaciones también tienen la capacidad de controlar y monitorear los satélites, ajustando sus órbitas y asegurando su correcto funcionamiento. Las estaciones terrenas regulan la interconexión entre terminales, administran los canales de salida, codifican los datos y controlan la velocidad de transferencia [10].

Constan de tres componentes:

- **Antena:** Es la responsable de captar las señales provenientes del satélite y concentrarlas en un punto focal donde se encuentra el alimentador. Su capacidad para recibir y emitir señales con mayor intensidad depende de sus dimensiones. Además, una antena de calidad debe ser capaz de filtrar interferencias y ruidos para garantizar una comunicación clara y confiable. Asimismo, pueden ser tanto receptoras como transmisoras, y mediante ajustes en sus patrones de radiación, pueden generar coberturas globales o dirigidas a áreas específicas [11].
- **Estación emisora:** Se compone del transmisor y la antena de emisión. Emite señales con alta potencia para asegurar una calidad óptima que pueda ser captada por el satélite. Estas señales, enviadas con la modulación y portadora adecuadas, cubren el trayecto ascendente hacia el satélite. Utiliza medios no guiados, como el aire, como medio físico de transmisión. Se emplean señales de microondas, que son unidireccionales y susceptibles a la atenuación por la lluvia. Estas señales pueden tener baja o alta frecuencia, generalmente en el rango de los 100 MHz hasta los 10 GHz [11].
- **Estación receptora:** Recibe toda la información generada en la estación transmisora y retransmitida por satélite [11].

2.3 Sistemas Satelitales

Los sistemas satelitales son conjuntos de tecnología diseñados para proporcionar diversos servicios de comunicación y observación mediante el uso de satélites en órbita alrededor de la Tierra. Estos sistemas están compuestos por varios elementos clave y se emplean para transportar información desde satélites ubicados en órbita hacia estaciones terrestres, haciendo uso de frecuencias en el espectro radioeléctrico [12].

2.4 Tipos de Satélite

2.4.1 Satélite Natural

Un satélite natural es un cuerpo celeste que se forma de manera natural en el espacio y órbita alrededor de un planeta o un objeto mayor debido a la fuerza de gravedad. Estos satélites siguen un sentido de rotación en una órbita específica. Un ejemplo destacado es la Luna, que se encuentra a 384,321 km de la Tierra y gira alrededor de ella bajo la influencia de su campo gravitacional [13].

2.4.2 Satélite Artificial

Un satélite artificial es un objeto fabricado por seres humanos y lanzado desde la superficie terrestre para orbitar alrededor de la Tierra o de otro cuerpo celeste. Estos satélites, que tienen un tamaño y peso determinados, generalmente tienen una vida útil de aproximadamente 15 años. Están equipados con diversos instrumentos y equipos que les permiten realizar una variedad de funciones, incluyendo brindar servicios de radiocomunicación, televisión, Internet, estudios meteorológicos, y recolección de datos.

Entre los ejemplos de satélites satelitales tenemos: Intelsat 18, Eutelsat 172, Anik F2, Sirius FM 6, Direct TV 7S, TELSTAR 19V, etc [13].

2.5 Órbitas Satelitales

Las órbitas satelitales son las trayectorias específicas que siguen los satélites alrededor de un cuerpo celeste, como la tierra, bajo la influencia de la gravedad. Estas órbitas varían en altitud, inclinación y forma, y se seleccionan en función de la misión y los objetivos del satélite. Existen varios tipos de órbitas satelitales, (GEO, MEO Y LEO) que se ilustran en la Figura 1 [13], [14]:

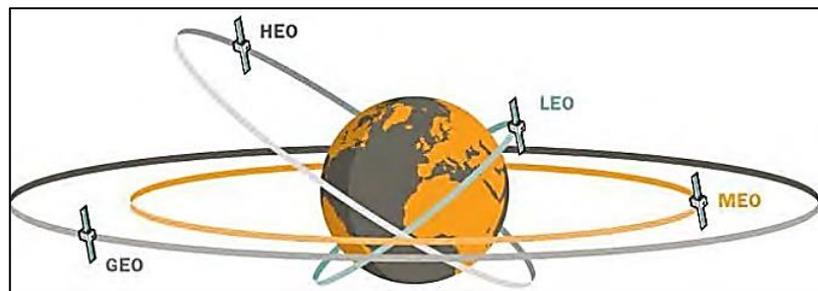


Figura 1: Tipos de órbitas [14].

2.5.1 Satélites Geoestacionarios (GEO)

Los satélites geoestacionarios (GEO) orbitan la Tierra a unos 35,786 kilómetros sobre el ecuador en una órbita circular ecuatorial. Permanecen fijos respecto a un punto en la superficie terrestre debido a que su período orbital coincide con la rotación de la Tierra (24 horas). Para mantener su posición, los satélites GEO requieren correcciones periódicas debido a perturbaciones gravitacionales y otras fuerzas. Son fundamentales para telecomunicaciones, transmisión de TV y radio, meteorología y servicios de satélite directo al hogar. Tres satélites GEO pueden proporcionar cobertura global a aproximadamente un tercio de la superficie terrestre [15].

2.5.2 Satélites de Órbita Media (MEO)

Los satélites de órbita terrestre media (MEO) se sitúan a alturas entre 10,075 y 20,150 km sobre la Tierra. A diferencia de los satélites GEO, su posición relativa respecto a la superficie no es fija. Esto implica que se necesitan más satélites MEO para lograr una cobertura

mundial, pero a cambio se reduce significativamente la latencia. Estos satélites se utilizan principalmente para sistemas de navegación y posicionamiento global, como el GPS, GLONASS y Galileo, así como en algunas aplicaciones de comunicaciones y monitoreo ambiental [12].

2.5.3 Satélites de Órbita Baja (LEO)

Los satélites de órbita baja (LEO) orbitan la Tierra a altitudes de 200 a 2,000 kilómetros, mucho más cerca de la superficie terrestre que los satélites GEO y MEO. Con un período orbital de aproximadamente 90 a 120 minutos, estos satélites son utilizados para observación de la Tierra, monitoreo ambiental, imágenes satelitales y servicios de comunicación. Operan a altitudes de 725 a 1,450 km, requiriendo más de 40 satélites para una cobertura total. Proyectan haces sobre la superficie terrestre con diámetros desde 600 hasta 58,000 km y dividen las frecuencias en celdas reutilizables. Las órbitas LEO mejoran la calidad de la señal y reducen el retardo de transmisión, siendo preferidas por compañías de telefonía móvil y comunicación de datos. Sin embargo, debido a su baja altura, requieren numerosos satélites para proporcionar cobertura global en aplicaciones en tiempo real [16].

El satélite que se utilizará para el diseño de la red satelital en la parroquia Columbe se encuentra ubicado en la órbita GEO. Esto se debe a las características que ofrece, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1: Diferencias entre satélites de diferentes órbitas.

	LEO	MEO	GEO
Costo del satélite	Máximo	Mínimo	Medio
Vida del satélite (años)	3 - 7	10 - 15	15 - 15
Terminal portátil	Posible	Posible	Muy difícil
Retraso en propagación	Corto	Medio	Grande
Cobertura del satélite	Corta	Media	Todo el tiempo
Hand-off	Constantemente	Moderado	Nunca
Complejidad de la red	Compleja	Medianamente	Simple
Pérdidas en propagación	Baja	Media	Alta
Servicios	Imágenes	GPS	Voz, datos, internet

2.6 Redes VSAT

Las redes VSAT (Terminal de apertura muy pequeña) son sistemas de comunicación satelital que utilizan antenas parabólicas pequeñas, típicamente menores a 2.5 metros de diámetro, ubicadas en la superficie terrestre para mantener una comunicación permanente con los satélites geoestacionarios (GEO) a unos 35,786 km de altitud [12].

Estas redes brindan servicios de datos, voz y video mediante enlaces punto a punto y punto - multipunto, operan en las bandas de frecuencia C, Ku y Ka. Con las bandas Ku y Ka ofrecen una mayor capacidad, permitiendo el uso de antenas más pequeñas, aunque son más susceptibles a las condiciones meteorológicas. Presentan latencias mayores en comparación

con las redes terrestres debido a la distancia que las señales deben recorrer de ida y vuelta hasta el satélite, lo que las hace adecuadas para aplicaciones tolerantes a esta latencia. Pueden ofrecer cobertura global mediante múltiples satélites, requiriendo una planificación cuidadosa para gestionar el tráfico y evitar interferencias [17].

Este tipo de redes ha evolucionado, gracias a la tecnología DVB por satélite y a otros tipos de sistemas de mayor integración [17].

Estas características técnicas permiten que las redes VSAT sean una solución efectiva y confiable para telecomunicaciones, transmisión de televisión y radio, acceso a Internet, redes de datos interactivas, sistemas de navegación y monitoreo ambiental en áreas con infraestructura terrestre limitada o inexistente [17].

Las redes VSAT constan de tres componentes principales:

- **GEO (Satélites Geoestacionarios):** Estos satélites mantienen una posición fija relativa a la Tierra debido a su órbita sincrónica con la rotación terrestre. Orbitan a una altitud de 35,786 km y actúan como repetidores, facilitando la transmisión de señales entre estaciones terrestres [18].
- **NOC (Hub o Telepuerto):** Es la estación central de la red VSAT, equipada con antenas grandes (4 a 11 metros de diámetro) y transmisores de alta potencia. El NOC o HUB modula y combina las señales de las estaciones VSAT emisoras y las retransmite a las estaciones receptoras. También gestiona el tráfico entre terminales y optimiza el uso de la capacidad satelital [18].
- **Estaciones remotas:** Son equipos VSAT ubicados en diversos puntos para transmitir y recibir señales de los satélites geoestacionarios. Incluyen antenas VSAT, unidades de control, módems y equipos de routing y VoIP, conectando computadoras y teléfonos [18].

La Figura 2 esquematiza la composición de una red de comunicaciones satelitales VSAT, detallando tanto el enlace de subida como el de bajada, junto con sus principales componentes: el satélite, las estaciones terrenas y los usuarios terminales.

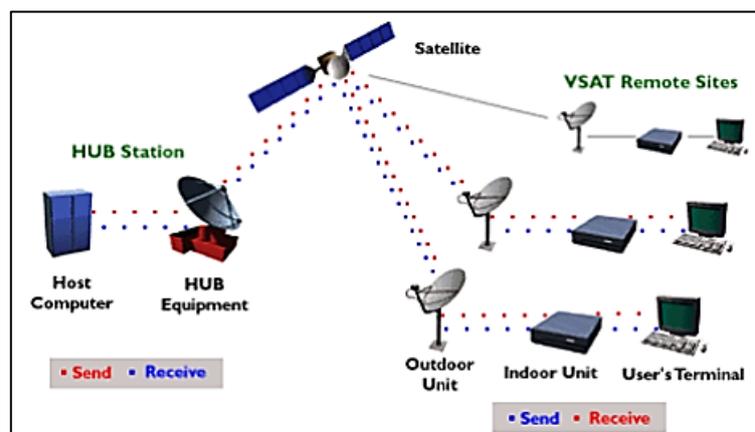


Figura 2: Red satelital VSAT [19].

2.7 Bandas de Frecuencia Satelitales y Cobertura

Las bandas de frecuencias satelitales son rangos específicos del espectro electromagnético asignados para la comunicación por satélite, utilizadas para transmitir datos, televisión, navegación y comunicación militar. Dado que las ondas electromagnéticas se ven afectadas por la materia según su frecuencia, solo una parte del espectro puede atravesar la atmósfera terrestre, siendo útil para las comunicaciones satelitales [20].

En la tabla 2, se resumen las bandas de frecuencia más utilizadas en las comunicaciones satelitales.

Tabla 2: Bandas de frecuencia.

Banda	Rango de frecuencia	Aplicaciones
L	1 - 2 GHz	Navegación (GPS, GLONASS, Galileo), comunicaciones móviles satelitales.
S	2 - 4 GHz	Comunicaciones móviles satelitales, radioaficionados, telemetría.
C	4 - 8 GHz	Televisión satelital, comunicaciones de datos, enlaces de comunicación de larga distancia.
X	8 - 12 GHz	Comunicaciones militares, radar, algunas aplicaciones científicas.
Ku	12 - 18 GHz	Televisión directa al hogar (DTH), Internet por satélite, comunicaciones empresariales.
K	18 - 27 GHz	Investigación científica, comunicaciones de datos.
Ka	27 - 40 GHz	Internet por satélite de alta velocidad, comunicaciones de banda ancha.
EHF	30 - 300 GHz	Comunicaciones de alta frecuencia, investigación científica, algunas aplicaciones militares.

Los satélites transmiten principalmente en las bandas C (4 - 8 GHz) y Ku (12 - 18 GHz), valoradas por su capacidad y resistencia a interferencias meteorológicas. La banda Ka (27 - 40 GHz), con un ancho de banda más amplio y mayores velocidades de transmisión, está ganando popularidad, aunque presenta desafíos adicionales debido a su mayor sensibilidad a las condiciones atmosféricas adversas [20].

2.8 Satélites Autorizados para Operar en Ecuador por la ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones)

En la tabla 3, se presentan los satélites habilitados por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones para operar en el Ecuador. Se muestra la información más relevante como su representante legal, empresa prestadora del servicio y los datos del satélite [21].

Tabla 3: Satélites habilitados por la ARCOTEL para operar en Ecuador [21].

No.	Representante legal	Empresa Prestadora del servicio	Nombre del satélite o red satelital	Posición Orbital	Rango de frecuencias (Mhz)
1	Geovanna del rocío zurita GERENFOQUE S.A.	Starlink Ecuador	Starlink ngso	Satélites no Geoestacionarios	10700 - 12700 14000 - 14500
2	CNT EP		E117WB	117°W	10950 - 11200 11450 - 11700 13750 - 14000 14500 - 14750
3	GPASESORES S.A. (Michael Veintimilla)	HISPASAT S. A	Amazonas 2	61°W	12750 - 13250 13750 - 14500 10700 - 11450 11700 - 12200 4650 - 4710 6725 - 7025
			Amazonas 3	61°W	13750 - 14500 10950 - 11200 11700 - 12200 12500 - 12750 18300 - 20200 28100 - 30000 5850 - 6425 3700 - 4200
			HISPASAT 74W-1	74° W	12200 - 12700 17300 - 17800
			Amazonas 5	61°W	12200 - 12700 17300 - 17800 27000 - 30000 17700 - 20200
			HISPASAT 30W-5	30°W	11950 - 12200 13750 - 14000
			HISPASAT 30W-6	30°W	11200 - 11450 11700 - 11950 12100 - 12200 13000 - 13250 13900 - 14250 4650 - 4710 6725 - 7025
			HISPASAT 36W-1	36°W	11950 - 12200 14250 - 14500
			SES 17	67°W	17700 - 20200 27500 - 30000

4	PBP Representaciones CIA. LTDA. (Mateo Antonio Tobar Moncayo)	New skies satellites licensee by	NSS-10	37.5°W	3700 - 4200 5850 - 6425
			SES-4	22°W	3700 - 4200 5850 - 6425 10950 - 11200 11450 - 12000 12500 - 12750 13750 - 14500
			NSS-7	20°W	3700 - 4200 5850 - 6425 10950 - 11200 11450 - 12200 12500 - 12750 14000 - 14500
			SES-14	47.5°W	3625 - 4200 5850 - 6430 10950 - 11200 11450 - 12200 13750 - 14500
			SES-6	40.5°W	3700 - 4200 5850 - 6425 11450 - 12200 13750 - 14500 4650 - 4710 6725 - 7025
			O3b	Satélites no geoestacionarios	17700 - 20200 27500 - 30000
			SES-10	67°W	11450 - 12200 13750 - 14500
5	REDLEGAL & ASOCIADOS CIA. LTDA. (Mercedes	Panamsat de méxico, sociedad de responsabili dada	INTELSAT 31 (IS-31)	95.05° W	10950 - 11200 11450 - 11700 11700 - 12200 13750 - 14500
			INTELSAT 34 (IS-34)	55.5° W	5925 - 6425 3700 - 4200 14000 - 14500 11450 - 11700 11700 - 12200
			GALAXY 3C (G-3C)	95°W	11450 - 12200 13750 - 14500 3700 - 4200 5925 - 6425
			GALAXY 28 (G-28)	89°W	11700 - 12200 14000 - 14500 3700 - 4200

Alejandra Soriano)	limitada de capital variable			5925 - 6425
		INTELSAT 11 (IS-11)	317°E	3700 - 4200 5925 - 6425
		INTELSAT 14 (IS-14)	315°E	3700 - 4200 5925 - 6425 11450 - 11950 14000 - 14500
		INTELSAT 21 (IS-21)	302°E	3700 - 4200 5925 - 6425 11450 - 12200 14000 - 14500
		INTELSAT 23 (IS-23)	307°E	3700 - 4200 5925 - 6425 11450 - 12200 14000 - 14500
		INTELSAT 30 (IS-30)	95°W	10950 - 11200 11450 - 12200 13750 - 14500
		INTELSAT 901 (IS-901)	332.5°E	10950 - 11200 11450 - 11700 14000 - 14500 3700 - 4200 5850 - 6425
		INTELSAT 905 (IS-905)	335.5°E	3700 - 4200 5850 - 6425 10950 - 11200 11450 - 11700 14000 - 14500
		INTELSAT 10-02 (IS-10-02)	359°E	3700 - 4200 5850 - 6425 10950 - 11200 11450 - 11700 12500 - 12750 13750 - 14500
		INTELSAT IS-35e	325.5° E	11450 - 11700 13750 - 14500 3700 - 4200 5850 - 6425

2.9 Efectos de la Atmosfera Terrestre en Comunicaciones Satelitales

La atmósfera terrestre afecta las comunicaciones satelitales en diversas formas, dependiendo de la capa atmosférica con la que interactúan las señales. A continuación, se describen los efectos de cada capa de la atmósfera terrestre.

- **Tropósfera:** Se extiende desde la superficie terrestre hasta unos 12 km de altura, contiene la mayor parte del vapor de agua y las partículas de polvo. Los fenómenos meteorológicos como la lluvia, la niebla y las nubes en esta capa pueden causar atenuación y dispersión de las señales satelitales. Esto afecta especialmente a las bandas Ku y Ka, donde la atenuación por la lluvia puede reducir la intensidad y calidad de la señal [22].
- **Estratósfera:** Se extiende entre los 12 y 50 km de altura, contiene la capa de ozono, que absorbe y dispersa la radiación ultravioleta. Esta capa tiene un impacto menor en las señales de radiofrecuencia utilizadas en las comunicaciones satelitales. En general, la estratosfera afecta mínimamente las frecuencias de las comunicaciones satelitales, permitiendo que las ondas de radio pasen sin una atenuación significativa [22].
- **Mesósfera:** Ubicada entre 50 y 85 km de altura, es donde se desintegran la mayoría de los meteoritos debido a la fricción con el aire. Con una densidad baja, su impacto en las comunicaciones satelitales es insignificante. Al igual que la estratosfera, la mesosfera tiene un efecto mínimo en las frecuencias utilizadas para las comunicaciones satelitales [22].
- **Termósfera:** Se extiende desde los 85 hasta aproximadamente 600 km de altura, contiene la ionosfera, una región rica en iones y electrones libres. La ionosfera puede reflejar y refractar las ondas de radio, afectando su propagación. La actividad solar puede causar fluctuaciones en la densidad ionosférica, impactando la precisión de las señales GPS y la calidad de las comunicaciones HF (3-30 MHz). Las frecuencias más altas también pueden verse afectadas por la dispersión y el retraso [22].
- **Exósfera:** Es la capa más externa de la atmósfera, extendiéndose desde los 600 km hasta más allá de los 10,000 km de altura. Debido a su baja densidad, esta capa tiene un impacto mínimo en las comunicaciones satelitales. Las frecuencias utilizadas para las comunicaciones satelitales no se ven significativamente afectadas por la exosfera, permitiendo una transmisión eficiente de señales [22].

2.10 Transmisión de Datos DBS – S (Direct Broadcast Satellite – Satellite)

Es una tecnología utilizada para transmitir señales de televisión y datos a los usuarios finales mediante satélites de transmisión directa. Este sistema opera principalmente en las bandas Ku (12-18 GHz) y C (4-8 GHz), utilizando modulación QPSK y esquemas de corrección de errores como Reed-Solomon y convolucional para asegurar la integridad de los datos. Los sistemas DBS-S son comunes en la televisión directa al hogar (DTH), servicios de radiodifusión de datos y transmisiones en vivo de eventos y noticias (DSNG). Además, DBS-S también han permitido la transmisión de datos, facilitando el acceso a internet mediante redes privadas. Sin embargo, para que aplicaciones de este tipo sean posibles, se requiere un camino inverso que puede pasar por la red terrestre o por el propio satélite. Proporcionando una solución de bajo costo para el acceso a internet de banda ancha en cualquier lugar cubierto por un enlace satelital que brinde servicio DVB para permitir la transmisión de datos [23].

El proyecto DVB (Digital Video Broadcasting) ha desarrollado varios estándares técnicos para la transmisión de televisión digital y datos, siendo DVB-S uno de los más importantes. Adoptado por la ETSI en 1995, DVB-S utiliza modulación QPSK y corrección de errores con Reed-Solomon y convolucional. La evolución hacia DVB-S2 en 2005 mejoró la eficiencia espectral con modulación adaptable y nuevas técnicas de corrección de errores, soportando tecnologías avanzadas de compresión de video como MPEG-4 AVC. La extensión DVB-S2X, introducida en 2014, ofrece mayor flexibilidad y eficiencia, soportando modulaciones de orden superior y frecuencias más altas, ideal para servicios de banda ancha y aplicaciones interactivas. Estos sistemas también han permitido la transmisión de datos y el acceso a Internet de banda ancha en áreas cubiertas por enlaces satelitales [23].

2.11 Proyectos Piloto de HISPASAT Mediante Comunicaciones Satelitales en Ecuador

HISPASAT, el operador español de telecomunicaciones por satélite del Grupo Red Eléctrica, ha lanzado dos proyectos piloto de teleeducación y telemedicina en Ecuador para reducir la brecha digital en zonas remotas. Estos proyectos se han desarrollado en colaboración con el gobierno ecuatoriano, incluyendo el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, el Ministerio de Educación, el Ministerio de Salud Pública y la Vicepresidencia [24].

Proyecto Piloto de Teleeducación

Este proyecto beneficiará a más de 400 estudiantes de escuelas en las provincias de Carchi, Orellana, Morona Santiago y Napo, ubicadas en zonas sin conectividad. HISPASAT proporcionará servicios de Internet vía satélite y un sistema de teleeducación que permite almacenar y acceder a contenidos educativos localmente. Además, instalará un servicio de conectividad WiFi para la comunidad y equipará las aulas con tecnología avanzada, incluyendo portátiles, tablets, paneles digitales interactivos y software de gestión [24].

Proyecto Piloto de Telemedicina

El proyecto de telemedicina se implementará en la parroquia rural de Cuasha, en la provincia de Pastaza, y en el Hospital General de Puyo. Incluirá un sistema de teleconsulta remota con equipamiento médico avanzado y videoconferencia de alta calidad. Esto permitirá a los asistentes médicos realizar diagnósticos y mediciones de constantes vitales con la supervisión en tiempo real de especialistas del hospital.

Estos proyectos piloto son un paso importante para reducir la brecha digital en Ecuador, mejorando la calidad de vida en zonas remotas y facilitando el acceso a la educación y la salud mediante la tecnología satelital [24].

2.12 Aplicaciones

Las aplicaciones de la red VSAT se dividen universalmente en dos categorías principales, basadas en la dirección del flujo de información en la red: unidireccionales y bidireccionales.

2.12.1 Aplicaciones Unidireccionales

En este tipo de aplicaciones, la información se transmite en una sola dirección. Un ejemplo típico es la transmisión de televisión por satélite, donde las señales se envían desde una estación central a múltiples receptores sin que haya retorno de información desde los receptores. Estas aplicaciones son eficaces para la difusión de contenidos a una audiencia amplia, como la televisión o la radio, donde no se requiere una respuesta inmediata del usuario [25].

2.12.2 Aplicaciones Bidireccionales

Las aplicaciones bidireccionales permiten la transmisión de información en ambas direcciones, desde el transmisor al receptor y viceversa. Esto es esencial para servicios interactivos como el acceso a internet, videoconferencias y otros servicios que requieren intercambio de datos en tiempo real. Las aplicaciones bidireccionales son fundamentales en la era digital, donde la interacción y la comunicación rápida y efectiva son cruciales [25].

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

Este capítulo detalla los aspectos metodológicos que guiaron la ejecución de la investigación, abordando el tipo de investigación, método de investigación, procedimiento y análisis, población de estudio y tamaño de la muestra, así como el método de análisis y procesamiento de datos.

3.1 Tipo de Investigación

Este proyecto se focaliza en el diseño de una red satelital VSAT, en el cual para proponer dicho diseño se analizan e indican varios parámetros como, la estructura de la red, el área de cobertura alcanzada y el rendimiento que puede proporcionar el enlace satelital VSAT. Para esto se considera emplear una investigación de tipo exploratoria, descriptiva y experimental.

3.2 Método de Investigación

3.2.1 Investigación exploratoria

Mediante una revisión bibliográfica se pretende realizar una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre redes satelitales, tecnología VSAT, estándares de comunicación satelital, arquitecturas de red, protocolos y tecnologías relacionadas. Con esto se podrá obtener una comprensión sólida del campo y a identificar los desafíos y oportunidades actuales.

3.2.2 Investigación descriptiva

Por medio de encuestas y entrevistas a expertos en el campo de las redes satelitales VSAT, se desea obtener información relevante sobre requerimientos técnicos, características de diseño, consideraciones de desempeño, etc. Estos datos pueden proporcionar una perspectiva cualitativa sobre la experiencia y conocimiento de los expertos.

Además, se recopilarán datos secundarios, como informes técnicos, documentos normativos, informes de proyectos anteriores y datos de rendimiento de redes satelitales existentes. Estos datos cuantitativos serán analizados para identificar tendencias, patrones y estadísticas que apoyen en el diseño de la red satelital VSAT.

3.2.3 Investigación experimental

Por medio de herramientas de simulación y modelado se pretende desarrollar pruebas de rendimiento en un entorno controlado para evaluar el desempeño de los equipos VSAT, como antenas, transceptores, módems, etc. Y de esta manera recopilar datos cuantitativos sobre la calidad de la señal, la tasa de transferencia de datos, la latencia y otros parámetros

de interés para realizar un análisis estadístico de los datos recopilados durante las pruebas experimentales.

3.3 Procedimiento y Análisis

En la Figura 3, se muestra el procedimiento para el desarrollo de este trabajo de investigación, el cual ha sido dividido en 4 fases.

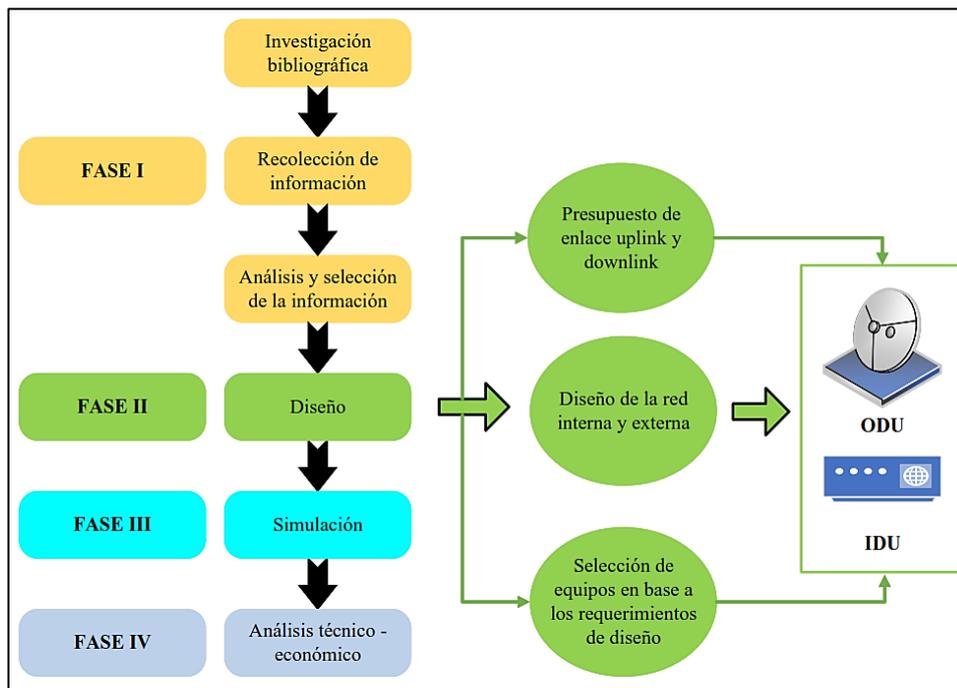


Figura 3: Modelo metodológico.

3.3.1 Fase I: Recolección, análisis y selección de la información bibliográfica

En esta fase se lleva a cabo un estudio bibliográfico sobre redes satelitales, con el fin de recopilar información necesaria para diferenciar y documentar los componentes necesarios para el desarrollo del proyecto. También se obtiene información adicional indagando en informes gubernamentales, comunicados de prensa, revistas científicas e internet. Por consiguiente, se realiza entrevistas y sondeos a los habitantes de la parroquia Columbe para conocer su situación actual en cuanto a las demandas actuales de telecomunicaciones.

3.3.2 Fase II: Diseño

Para la fase de diseño primeramente se procede a elegir la topología adecuada para la red satelital VSAT que se desea realizar. Así mismo, se desarrolla el presupuesto del enlace de subida (uplink) y del enlace de bajada (downlink), utilizando ecuaciones matemáticas para determinar la factibilidad del enlace, considerando los parámetros y criterios de conformidad con los estándares establecidos para el diseño.

3.3.3 Fase III: Simulación

Mediante el software Matlab con las herramientas Satellite Scenario Viewer y Satellite Link Budget Analyzer se realizan simulaciones para verificar la factibilidad del enlace VSAT y con el software GNS3 se comprueba el rendimiento de la red de área local (LAN).

3.3.4 Fase IV: Análisis Técnico – Económico

Se establece un precio estimado a la instalación física de las estaciones VSAT con los equipos necesarios tanto de la unidad externa (ODU) como la unidad interna (IDU). Además, es importante determinar los costos de arrendamiento el ancho de banda del satélite y del mantenimiento regular de la red para asegurar una operación continua y eficiente.

3.4 Población de Estudio y Tamaño de la Muestra

3.4.1 Población de Estudio

La población está compuesta por todos los usuarios que habitan en la parroquia Columbe del cantón Colta de la provincia de Chimborazo, que son aproximadamente 9.132 habitantes según el censo de población y vivienda realizado a provincias, cantones y parroquias por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en el año 2022 [26].

3.4.2 Tamaño de la Muestra

La muestra en esta investigación, se considera una población infinita. Dado que es apropiado cuando se trabaja con poblaciones grandes o cuando no se dispone de un censo exacto.

En este caso se busca obtener una muestra representativa con un nivel de confianza del 95% y margen de error del 5%.

Para encontrar el tamaño de la muestra para esta investigación se tomarán en cuenta los siguientes parámetros.

Donde:

n = Tamaño de la muestra.

Z = Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza.

e = Error de estimación aceptado.

p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito).

q = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{e^2} \quad (3.1)$$

$$n = \frac{1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.05^2} \quad (3.2)$$
$$n = 384.16$$

Redondeando en 385 dispositivos que se espera que estén conectados a la red diseñada, lo que permitirá hacer el análisis de la calidad de servicio.

3.5 Operacionalización de Variables

Tabla 4: Variable independiente y dependiente.

Variables independientes	Descripción	Indicador	Técnicas e Instrumentos
Cantidad de dispositivos que la red puede soportar	Conjunto de elementos conectados a la red.	<ul style="list-style-type: none"> • Equipos • Medios utilizados • Capacidad tecnológica 	<ul style="list-style-type: none"> • Topología • Seguimiento de estándares • Estadísticas • Observación
Variables dependientes	Descripción	Indicador	Técnicas e Instrumentos
Calidad del servicio	La capacidad que tiene la red satelital VSAT para administrar la demanda de tráfico.	<ul style="list-style-type: none"> • Rapidez de carga y descarga • Latencia, • Tasa de error 	<ul style="list-style-type: none"> • Computador • Herramientas de prueba de velocidad de internet y aplicaciones.

3.6 Diseño de la Red Satelital VSAT

Una vez comprendidas las comunicaciones satelitales, su tecnología, uso de frecuencias, cobertura, ventajas y desventajas, se debe realizar un análisis preliminar de variantes del escenario para mejorar la conectividad en Columbe. A continuación, se presentan las consideraciones principales para diseñar el sistema VSAT propuesto.

3.6.1 Topología

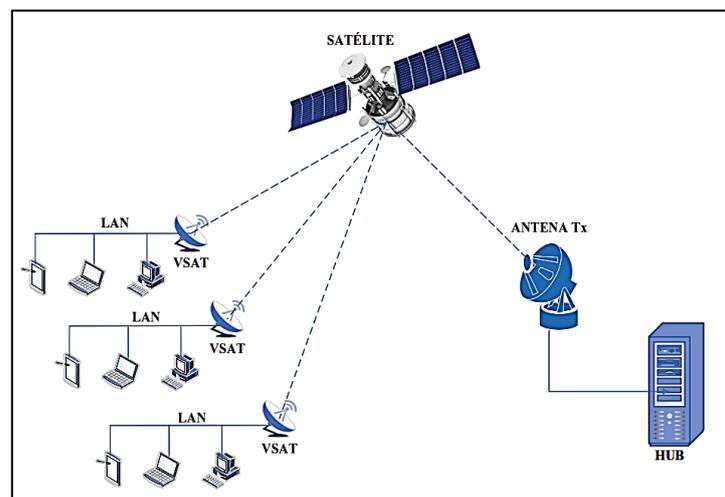


Figura 4: Topología de red VSAT.

En la Figura 4 se muestra una topología en estrella mediante un sistema VSAT punto-multipunto que centraliza las comunicaciones en un HUB (Estación Terrena Maestra), optimizando la gestión y distribución de datos. En esta configuración, cada usuario tiene un enlace punto a punto dedicado con el HUB central, lo que garantiza comunicaciones directas y confiables. Esta estructura simplifica la gestión de la red, mejora la seguridad y facilita la escalabilidad, siendo una solución robusta y eficiente para la gestión de redes de telecomunicaciones.

3.6.2 Frecuencia de Trabajo

La frecuencia de trabajo depende de la disponibilidad y de la banda deseada para la red, como se muestra en la Figura 5. Para el diseño, se elige la banda Ku, que permite el uso de antenas más pequeñas, facilitando la instalación y reduciendo costos. Además, optimiza la capacidad del satélite, mejorando la transmisión de datos y la calidad del servicio, siendo ideal para aplicaciones que requieren altas velocidades y conexiones fiables.

3.6.3 Tráfico

El tráfico estimado para esta red está directamente vinculado a la cantidad de dispositivos conectados, que son utilizados durante largos períodos de tiempo y que será principalmente para la navegación por internet por parte de los usuarios de Columbe. Por esta razón, se estima un tráfico de servicio relativamente alto, con un ancho de banda de 36 MHz que es el máximo proporcionado por el satélite como se detalla en la Tabla 5.

3.6.4 Modulación

La modulación 8-PSK es ideal para el sistema satelital VSAT debido a su alta eficiencia espectral, transmitiendo 3 bits por símbolo y maximizando el uso del espectro disponible. Aunque requiere una mejor relación señal a ruido (SNR) que Q-PSK y B-PSK, 8-PSK ofrece un balance óptimo entre eficiencia y robustez, permitiendo soportar aplicaciones de alta demanda de datos como video en streaming y VoIP, y proporcionando un bit rate más alto dentro del ancho de banda disponible.

3.6.5 Satélite

Para el satélite, es fundamental considerar que su área de cobertura abarque todo el territorio ecuatoriano como se observa en la Figura 5. Por esta razón, se utilizan los servicios satelitales de la compañía HISPASAT, con el satélite Amazonas 5 que cubre extensamente América Latina, incluyendo Ecuador, lo cual es crucial para garantizar una conexión estable y de calidad.

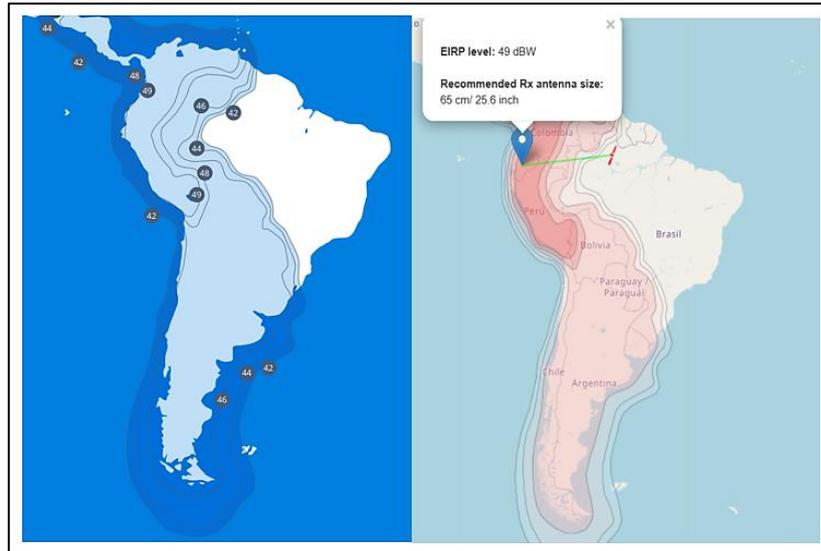


Figura 5: Área de cobertura del Amazonas 5 con valores de EIRP (dBW) [27].

Tabla 5: Características técnicas del Amazonas 5 [27]

Descripción	Amazonas 5
Posición orbital y coberturas	61°O, 2 coberturas en Ku y 34 spots en Ka
Transpondedores	24 transpondedores en banda Ku 34 spots en banda Ka
Ancho de banda	36 MHz en Ku
N.º de antenas	5
Procesador a bordo	No
Potencia carga útil	10 KW
Potencia disponible	11,5 KW
G/Te	5.3 dB/K
Vida útil	Más de 15 años
Fabricante	SSL
Lanzador	ILS

El Amazonas 5 proporciona una cobertura total en zonas remotas ecuatorianas para servicios de telecomunicaciones. Con una capacidad significativa en la banda Ku, es adecuado para servicios VSAT y manejo de grandes volúmenes de tráfico. Su avanzada tecnología y fiabilidad operativa aseguran un rendimiento robusto y baja latencia, con menos interferencias atmosféricas y costos competitivos.

3.7 Factores a Considerar para el Diseño

3.7.1 Pérdidas Atmosféricas

Las pérdidas atmosféricas pueden originarse por la absorción de gases como el oxígeno y el vapor de agua. Así mismo existen otros factores como la frecuencia, el ángulo de elevación, la altura sobre el nivel del mar y la humedad absoluta. Para frecuencias menores de 10 GHz,

el efecto de la absorción atmosférica es insignificante, pero para frecuencias mayores se alcanza valores promedio de 0.6 dB. La Tabla 6 muestra los valores de pérdidas atmosféricas según la frecuencia del enlace satelital [28].

Tabla 6: Valores de atenuación atmosférica [29].

Pérdidas Atmosféricas	Frecuencia (GHz)
0.25	$2 < f < 5$
0.33	$5 < f < 10$
0.53	$10 < f < 13$
0.73	$f > 13$

3.7.2 Efectos de la Lluvia

La atenuación por lluvia es un problema significativo en los enlaces satelitales, debido a la absorción y dispersión de las ondas electromagnéticas por las gotas de agua. Esta atenuación se ve influenciada por la frecuencia, la intensidad de la lluvia, el ángulo de elevación y la polarización de la señal. Para mitigar estos efectos, se utilizan márgenes de lluvia, redundancia de sistemas y control de potencia. En áreas con lluvias moderadas, la atenuación puede ser de 1 a 3 dB, mientras que en zonas con lluvias intensas puede superar los 10 dB. Este tipo de atenuación se evalúa para enlaces en los que la frecuencia supera los 6 GHz y matemáticamente se describe mediante la ecuación (3.3) [30].

$$Y(dBm/Km) = KR^\alpha \quad (3.3)$$

Dónde, $Y(dBm/Km)$ es la atenuación de una señal debido a la lluvia, expresada en decibelios por kilómetro, K y α son coeficientes de regresión que se indican en la Tabla 7 y R es la tasa de lluvia, medida en milímetros por hora (mm/h) que representa la intensidad de la lluvia en una ubicación específica como se muestra en la Tabla 8 [29].

Tabla 7: Coeficientes de regresión para estimar el valor de la atenuación específica [29].

Frecuencia (GHz)	Polarización Horizontal		Polarización Vertical	
	K	α	K	α
6	0.00175	1.308	0.00155	1.265
8	0.00454	1.327	0.00395	1.31
10	0.0101	1.276	0.00887	1.264
20	0.0751	1.099	0.0691	1.065
30	0.187	1.021	0.167	1
40	0.35	0.939	0.31	0.929
60	0.707	0.826	0.642	0.824
100	1.12	0.743	1.06	0.744

En la Figura 6 se puede observar las zonas climatológicas de intensidad de lluvia en América del Sur según la recomendación UIT-R P.837-1.

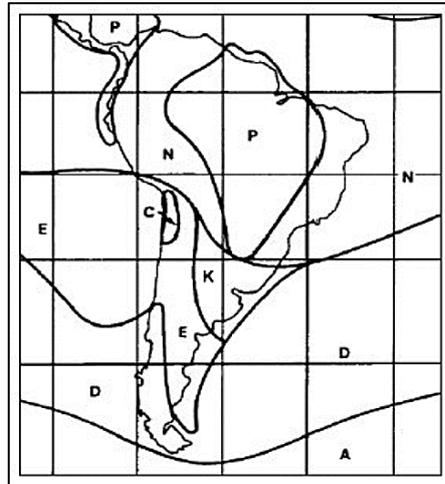


Figura 6: Zonas climatológicas de Intensidad de lluvia en América del Sur [29].

Para complementar la Figura 6, a continuación, en la Tabla 8 se presenta detalladamente las zonas hidrometeorológicas e intensidad de lluvia en (mm/h) según la recomendación UIT-R P.837-1[29].

Tabla 8: Zonas hidrometeorológicas e intensidad de lluvia en (mm/h) [29].

Porcentaje de Tiempo (%)	A	C	D	E	K	N	P
1.0	> 0.1	0.7	2.1	0.6	1.5	5	12
0.3	0.8	2.8	4.5	2.4	4.2	15	34
0.1	2	5	8	6	12	35	65
0.03	5	8	13	12	23	65	105
0.01	8	15	19	22	42	95	145
0.003	14	26	29	41	70	140	200
0.001	22	42	42	70	100	180	250

3.7.3 Pérdidas de Seguimiento

En un enlace ideal, la antena de transmisión terrestre debe estar perfectamente alineada para obtener la máxima ganancia. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que existe un pequeño grado de desalineación, lo que resulta en una disminución de la ganancia en unas décimas de dB. Estas pérdidas deben considerarse tanto para el enlace ascendente (uplink) como para el enlace descendente (downlink). En la Tabla 9 muestra los valores de perdidas seguimiento típicos [28].

Tabla 9: Pérdidas por seguimiento típicos [29].

Diámetro de la Antena	Ganancia de Tx (dBi)	Ganancia de Rx (dBi)	Pérdidas Uplink (dB)	Pérdidas Downlink (dB)	Seguimiento (Tracking)

1.2	42.6	40.5	0.4	0.2	Fijo
1.8	46.1	44	0.7	0.5	Fijo
2.4	48.7	46.6	1.1	0.8	Fijo
3.7	52.5	50.3	1.2	0.9	Manual
5.6	56.1	53.9	0.8	0.7	Manual
7	58	55.8	0.5	0.5	Seguimiento por pasos
8	59.2	57	0.5	0.5	Seguimiento por pasos

3.7.4 Ganancia de la Antena

Para la ganancia de la antena, se muestra la Figura 7, que consta de una relación entre la ganancia de una antena y su diámetro para diferentes frecuencias. A medida que el diámetro de la antena aumenta, también lo hace su ganancia, y esta relación es más pronunciada a frecuencias más altas, siendo esencial para diseñar sistemas de comunicaciones por satélite, permitiendo seleccionar el diámetro adecuado de la antena para alcanzar la ganancia deseada según la frecuencia de operación [31].

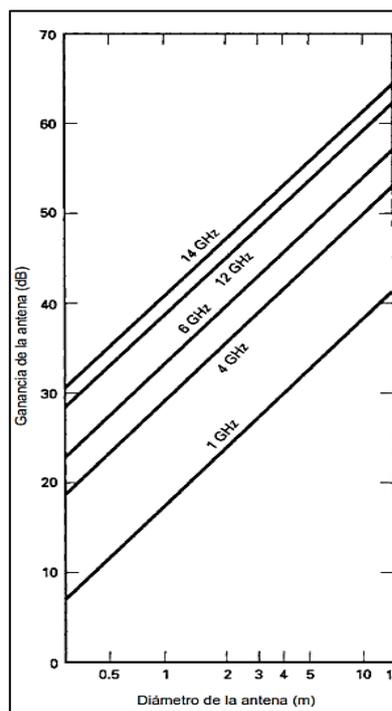


Figura 7: Relación entre ganancia y diámetro de una antena [31].

3.7.5 Relación Portadora a Ruido C/N

La Figura 7 muestra cómo varía la tasa de error de bit (BER) en función de la relación portadora a ruido C/N para diferentes esquemas de modulación digital. A medida que C/N aumenta, BER disminuye para todos los esquemas. Para este caso que se diseña una red

satelital VSAT para tener un enlace factible el valor de BER debe ser de mínimo 10^{-6} en 8-PSK.

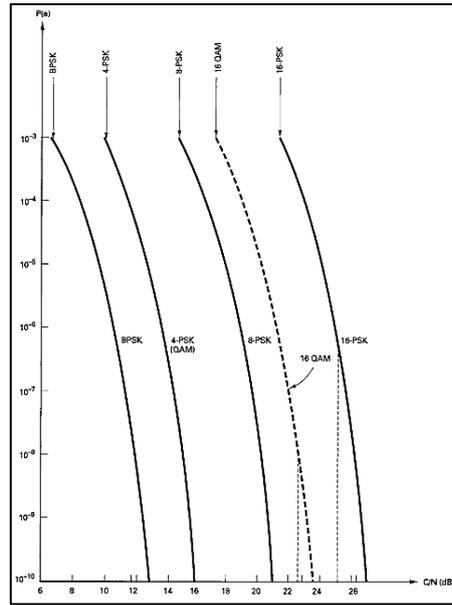


Figura 8: Relación C/N vs BER [31].

3.7.6 Relación Energía de Bit a Densidad de Ruido E_b/N_o

En la Figura 8 se muestra la relación entre la tasa de error de bit (BER) y la relación energía por bit a densidad espectral de ruido E_b/N_o para esquemas de modulación con diferentes niveles. A medida que E_b/N_o aumenta, BER disminuye para todos los esquemas de modulación [31].

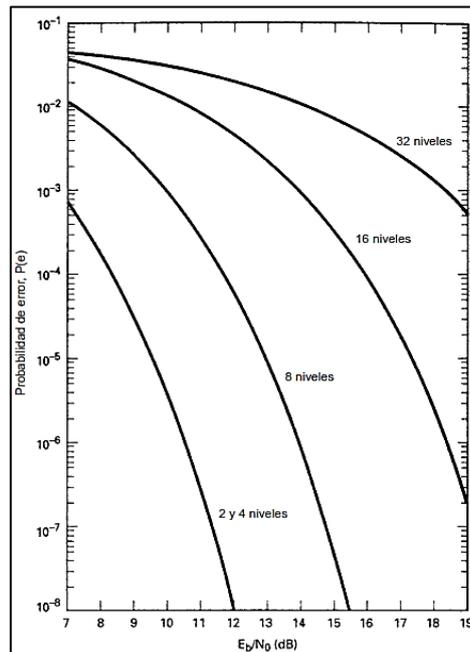


Figura 9: Relación E_b/N_o vs BER [31].

A continuación, en la Tabla 10 se presenta un resumen en base a las Figuras 8 y 9 con los valores mínimos de C/N y E_b/N_o que debe tener cada tipo de modulación para que el enlace sea factible [31].

Tabla 10: Comparación de valores de las modulaciones con BER 10^{-6} [29].

Modulación	Relación C/N (dB)	Relación E_b/N_o (dB)
BPSK	10.6	10.6
QPSK	13.6	10.6
4-QAM	13.6	10.6
8-QAM	17.6	10.6
8-PSK	18.5	14
16-PSK	24.3	18.3
16-QAM	20.5	14.5
32-QAM	24.4	17.4
64-QAM	16.6	18.8

3.8 Presupuesto de Enlace

3.8.1 Presupuesto de Enlace de Subida (Uplink)

La Tabla 11 detalla los datos técnicos recolectados en las secciones anteriores, para realizar los respectivos cálculos del presupuesto de enlace de subida.

Tabla 11: Valores para en presupuesto de enlace uplink.

Descripción	Valor
Potencia de salida del transmisor de la estación terrestre.	2000 W
Pérdidas por reducción en la estación terrestre.	3 dB
Pérdidas por ramificación y en alimentador de la estación terrestre	4 dB
Ganancia de la antena Tx de la estación terrestre (de la Figura 7, de 15 m a 14 GHz).	65 dBi
Pérdidas atmosféricas adicionales del enlace de subida.	0.53 dB
Relación G/Te del receptor en el satélite.	5.3 dB/K
Frecuencia de bits.	108 Mbps
Esquema de modulación.	8-PSK – 3 bps/Hz
Frecuencia	14 GHz
Distancia	35786 Km

3.8.1.1 Potencia de salida del transmisor de la estación terrestre, en la saturación, 2000 W

$$P_t = 10 \log 2000 = 33 \text{ dBW} \quad (3.4)$$

3.8.1.2 EIRP de la estación terrestre

$$EIRP_{Tx} = P_t + G_{Tx} - L_{bo} - L_{bf} \quad (3.5)$$

Pt = Potencia de salida del transmisor de la estación terrestre.

G_{Tx} = Ganancia de la antena Tx.

L_{bo} = Pérdidas por reducción en la estación terrestre.

L_{bf} = Pérdidas por ramificación y en alimentador de la estación terrestre.

$$\begin{aligned} EIRP_{Tx} &= 33 \text{ dBW} + 65 - 3 - 4 \\ EIRP_{Tx} &= 91 \text{ dBW} \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.8.1.3 Pérdidas en la trayectoria por el espacio libre

$$L_p = 20 \log D(\text{Km}) + 20 \log f(\text{GHz}) + 92.5 \quad (3.7)$$

D (km) = Distancia entre el satélite y la estación terrestre.

f (GHz) = Frecuencia de operación.

$$\begin{aligned} L_p &= 20 \log 35786 + 20 \log(14) + 92.5 \\ L_p &= 206.5 \text{ dB} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.8.1.4 Densidad de potencia de portadora en la antena del satélite

$$C' = EIRP_{Tx} - L_p - L_u \quad (3.9)$$

L_u = Pérdidas atmosféricas adicionales del enlace de subida.

$$\begin{aligned} C' &= 91 \text{ dBW} - 206.5 \text{ dB} - 0.53 \text{ dB} \\ C' &= -116.03 \text{ dBW} \end{aligned} \quad (3.10)$$

3.8.1.5 Relación señal a densidad de ruido C/N_o

$$C/N_o = C' + G/T_e - 10 \log K \quad (3.11)$$

K = Constante de Boltzmann.

G/T_e = Relación entre la ganancia de la antena Rx del satélite y la temperatura de ruido del sistema.

$$\begin{aligned} C/N_o &= -116.03 + 5.3 \text{ dB/K} - 10 \log(1.38 * 10^{-23}) \\ C/N_o &= 117.87 \text{ dB/Hz} \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.8.1.6 Relación de energía de bit a densidad de ruido E_b/N_o

$$E_b/N_o = C/N_o - 10 \log f_b \quad (3.13)$$

f_b = Frecuencia de bits.

$$\begin{aligned} E_b/N_o &= 117.87 \text{ dB} - 10 \log(108 * 10^6) \\ E_b/N_o &= 37.53 \text{ dB} \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.8.1.7 Relación portadora a ruido C/N

$$C/N = E_b/N_o - \frac{B}{f_b} \quad (3.15)$$

B = Ancho de banda mínimo.

$$C/N = 37.53 - 10 \log \frac{30 * 10^6}{108 * 10^6} = 43.09 \text{ dB} \quad (3.16)$$

3.8.2 Presupuesto de Enlace de Bajada (downlink)

La Tabla 12 detalla los datos técnicos recolectados en las secciones anteriores, para realizar los respectivos cálculos del presupuesto de enlace de bajada.

Tabla 12: Valores para en presupuesto de enlace downlink.

Descripción	Valor
Potencia de salida del transmisor en el satélite	11.5 KW – 40.60 dBW
Pérdidas por reducción en el satélite	0.5 dB
Pérdidas por ramificación y en alimentador del satélite	1 dB
Ganancia de la antena Rx de la estación terrestre (de la Figura 7, de 1.2 m a 12 GHz).	43 dBi
Pérdidas atmosféricas adicionales del enlace de subida.	0.53 dB
Frecuencia de bits.	108 Mbps
Esquema de modulación.	8-PSK – 3 bps/Hz

Frecuencia	12 GHz
Longitud y latitud de la estación terrestre Rx	78.72° O, 1.77° S
EIRP	49 dBW
Longitud del satélite	61° O

3.8.2.1 Orientación de la antena hacia el satélite

3.8.2.1.1 Ángulo azimut

$$\Delta L = \text{Longitud estación terrestre} - \text{Longitud satélite} \quad (3.17)$$

$$\Delta L = 78.72 - 61 \quad (3.18)$$

$$\Delta L = 17.72$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\tan(\Delta L)}{\sin(\text{Latitud estación terrestre})} \quad (3.19)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\tan(17.72)}{\sin(1.71)} \quad (3.20)$$

$$\theta = 84.658^\circ$$

3.8.2.1.2 Ángulo de elevación

$$\theta E = \left\{ \frac{\cos(\text{Latitud estación terrestre}) * \cos(\Delta L)^{-Re/h}}{\sin [\cos^{-1}(\cos(\text{Latitud estación terrestre}) + \cos(\Delta L))]} \right\} \quad (3.21)$$

Re = Radio de la tierra, 6378 Km.

h = Radio de la órbita GEO, 42164 Km.

$$\theta E = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(1.71) * \cos(17.72)^{-6378/42164}}{\sin [\cos^{-1}(\cos(1.71) * \cos(17.72))]} \right\} \quad (3.22)$$

$$\theta E = 69.131^\circ$$

3.8.2.2 Distancia entre el satélite y la estación terrestre Rx

$$D = 35786[1 + 0.4199(1 - \cos(\text{Latitud estación terrestre}) * \cos(\Delta L))]^{1/2} \quad (3.23)$$

$$D = 35786[1 + 0.4199(1 - \cos(1.77) * \cos(17.72))]^{1/2} \quad (3.24)$$

$$D = 36143.12 \text{ Km}$$

3.8.2.3 Densidad de flujo saturado (SDF)

$$SDF = EIRP (dBW) - 10 \log(4\pi * D^2) \quad (3.25)$$

$$SDF = 49 \text{ dBW} - 10 \log(4\pi * 36143.12^2) \quad (3.26)$$

$$SDF = -53.152 \text{ dBm}/m^2$$

3.8.2.4 Pérdidas en la trayectoria por el espacio libre

$$L_p = 20 \log D(Km) + 20 \log f(GHz) + 92.5 \quad (3.27)$$

D (km) = Distancia entre el satélite y la estación terrestre.

f (GHz) = Frecuencia de operación.

$$L_p = 20 \log 36143.12 + 20 \log(12) + 92.5 \quad (3.28)$$

$$L_p = 205.24 \text{ dB}$$

3.8.2.5 Atenuación por la lluvia

De la ecuación (3.3) con los datos de las Tablas 7 y 8.

$$Y(dBm/Km) = KR^\alpha \quad (3.29)$$

$$Y = 0.0101 * 95^{1.276} \quad (3.30)$$

$$Y = 3.37 \text{ dBm}/Km$$

3.8.2.6 Pérdidas de propagación

$$L = L_p + L_u + L_{rain} + L_{trank} \quad (3.31)$$

L_{rain} = Pérdidas por la lluvia.

L_{trank} = Pérdidas por seguimiento (Tabla 9).

$$L = 205.24 + 0.53 + 3.37 + 0.2 \quad (3.32)$$

$$L = 209.34 \text{ dB}$$

3.8.2.7 Temperatura de ruido del sistema

$$T_s = \left(\frac{T_{ant}}{L_a} \right) + \left(1 - \frac{1}{L_a} \right) * T_o + T_e \quad (3.33)$$

Tant = Temperatura de ruido de la antena.

La = Pérdidas de alimentación.

Te = Temperatura de ruido equivalente del receptor.

To = Temperatura física de referencia de la tierra, 290 K.

$$T_s = \left(\frac{40K}{1}\right) + \left(1 - \frac{1}{1}\right) * 290 K + 35 K \quad (3.34)$$
$$T_s = 75.2 K$$

3.8.2.8 Figura de mérito G/T_e

$$G/T_e = G_{Rx} - 10 \log T_s \quad (3.35)$$

$$G/T_e = 43 dB - 10 \log(75.2) \quad (3.36)$$

$$G/T_e = 24.23 dB/K$$

3.8.2.9 Densidad de potencia de portadora en la antena de la estación terrestre Rx

$$C' = EIRP_{Rx} - L_p - L_u \quad (3.37)$$

Lu = Pérdidas atmosféricas adicionales del enlace de bajada.

$$C' = 49 dBW - 205.24 dB - 0.53 dB \quad (3.38)$$
$$C' = -156.77 dBW$$

3.8.2.10 Relación señal a densidad de ruido C/N_o

$$C/N_o = C' + G/T_e - 10 \log K \quad (3.39)$$

K = Constante de Boltzmann.

$$C/N_o = -156.77 + 24.23 dB/K - 10 \log(1.38 * 10^{-23}) \quad (3.40)$$
$$C/N_o = 96.06 dB/Hz$$

3.8.2.11 Relación de energía de bit a densidad de ruido E_b/N_o

$$E_b/N_o = C/N_o - 10 \log f_b \quad (3.41)$$

fb = Frecuencia de bits.

$$E_b/N_o = 96.06 \text{ dB} - 10 \log(108 * 10^6) \quad (3.42)$$
$$E_b/N_o = 15.72 \text{ dB}$$

3.8.2.12 Relación Portadora a Ruido C/N

$$C/N = E_b/N_o - \frac{B}{f_b} \quad (3.43)$$

B = Ancho de banda mínimo.

$$C/N = 15.72 - 10 \log \frac{30 * 10^6}{108 * 10^6} = 21.28 \text{ dB} \quad (3.44)$$

3.8.2.13 Tasa de error de bit (BER)

$$BER = \frac{e^{-E_b/N_o}}{1.85 * \sqrt{E_b/N_o}} \quad (3.45)$$

$$BER = \frac{e^{-15.84}}{1.85 * \sqrt{15.84}} \quad (3.46)$$
$$BER = 8.96 * 10^{-9}$$

3.9 Diseño de la Red Interna

La Figura 10 esquematiza el diseño de la red interna, indicando como se establece una conexión desde el satélite hasta los dispositivos de usuario final. La señal del satélite es captada por una antena VSAT y procesada por la unidad exterior (ODU), que luego envían los datos a la unidad interior (IDU). Finalmente, se conecta a un punto de acceso o router Wifi que distribuye la conexión a múltiples dispositivos a través de una red local (LAN).

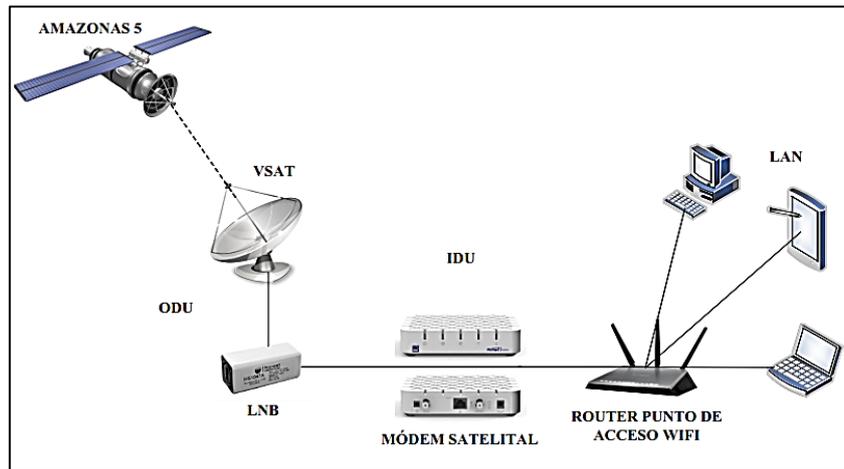


Figura 10: Diagrama de la red interna.

3.9.1 Unidad Externa (ODU)

3.9.1.1 Antena



Figura 11: Antena Norsat WAYFARER™ de 1,2 m [32].

La antena comercial Norsat WAYFARER™ de 1,2 m es una VSAT SATCOM compacta, fácil de usar y de despliegue rápido. Este terminal es una excelente opción para aplicaciones comerciales en diversas industrias ofreciendo excelentes enlaces satelitales, robustos y confiables. Ideal para aplicaciones remotas de empresas, energía, emergencias y medios de comunicación [32]. En la Tabla 13 se puede ver las especificaciones técnicas de la antena.

Tabla 13: Características técnicas de la antena [32].

Especificaciones Clave	
Frecuencia de transmisión	Banda Ku: 13,75 - 14,50 GHz
Frecuencia de recepción	Banda Ku: 10,70 - 12,75 GHz
Díámetro del reflector	1,2 m
Especificaciones de la Antena	
Rango de azimut	+/- 200°

Rango de elevación	10° - 90°
Configuración de la alimentación	Alimentación central
Anulaciones de movimiento	Manual (Azimut/Elevación)
Opciones estándar de LNB	Serie 1000H o HS1000, con conector tipo F
Especificaciones de RF	
Ganancia de Rx	42.5dBi+ 20log (f/11.85) dBi
Ganancia de Tx	43+ 20log (f/14.125) dBi
Especificaciones Medioambientales	
Humedad	0 - 95%
Velocidad del viento operativa	36 km/h
Supervivencia a la velocidad del viento	61 km/h

3.9.1.2 LNB



Figura 12: LNB [33].

El LNB de Norsat serie HS1000 específicamente el HS1047A, será el equipo responsable de amplificar y convertir en frecuencia la señal que viene del satélite. A continuación, se presenta las especificaciones técnicas del LNB HS1047A.

Tabla 14: Características técnicas del LNB [33].

Especificaciones Clave	
Banda de frecuencia de entrada 1	11,70 – 12,20 GHz
Frecuencia LO 1	10,75 GHz
Estabilidad de LO	±4 kHz
Tipo LO	PLL
Factor de ruido máximo	0,8 dB
Tipo de figura de ruido	0,7 dB
Banda de frecuencia de salida 1	950 - 1450 MHz
Especificaciones de RF	
Ganancia de conversión máxima	65 dB

Ganancia de conversión mínima	55 dB
Tipo de ganancia de conversión	60 dB
VSWR de entrada	2.5: 1 máx.
VSWR de salida	2.2: 1 máx.
Especificaciones de la Interfaz	
Conector IF	Conector F
Conector de entrada RF	Guía de ondas WR-75 ranurada
Especificaciones Medioambientales	
Temperatura operativa	De -40 a +60 °C
Almacenamiento de temperatura	De -40 a +60 °C

3.9.2 Unidad Interna (IDU)

3.9.2.1 Módem Satelital VSAT



Figura 13: Módem satelital VSAT [34].

El módem satelital multifuncional SkyEdge II-c Gemini-e S2X, actúa como intermediario entre la red satelital y la red LAN en la estación VSAT. Este modelo soporta todo tipo de servicios sobre internet, tales como navegación, VoIP, servicios de streaming de vídeo, además de incorporar varias características de alto rendimiento como TCP, aceleración web, encriptación de datos o caché de datos [34]. En la Tabla 15 se presentan las especificaciones técnicas.

Tabla 15: Características técnicas módem satelital [34].

Canal Directo	
Estándar	Codificación y Modulación Adaptativa DVB-S2X (ACM)
Tasa de portadora	1.5Msps – 500Msps
Roll-off	0.05, 0.1
Modulación	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK, 64APSK, 256APSK
Codificación	LDPC, BCH

FEC	DVB-S2X FECs
Canal de Retorno	
Esquema de acceso	MF-TDMA, Canales Dinámicos
Tasas de símbolos	128Ksps–12Msps
Codificación	LDPC
FEC	1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 8/9
Interfaces	
Entrada / Salida RF	<ul style="list-style-type: none"> • Dos conectores F hembra, 75 Ω RF en frecuencia: 950–2150 MHz. • Salida RF fuera de frecuencia: 950–2400 MHz.
Interfaces de datos	1 x Ethernet 10/100/1000BaseT RJ-45, VLAN 802.1q
Características de IP	IPv4/IPv6, TCP, UDP, IPsec, DHCP, NAT/PAT, DNS Caché, cRTP, IGMPv2, SIP, DiffServ, VLANs, RIPv2, rutas estáticas
QoS	Por VSAT y por Grupo Gestionado, CIR, MIR, CBR, DiffServ y cola basada en prioridad, priorización de aplicaciones
Protocolo y aceleración de aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Aceleración TCP • Aceleración y compresión HTTP web pre-fetch
Unidad Exterior (ODU)	
Bandas de frecuencia	C, Ku, Ka
Potencia de transmisión	Vía IDU 24V
Tamaño de la antena	0.7m y más grande

3.9.3 Punto de Acceso (Router Wifi)



Figura 14: Router Wifi [35].

El router Netgear Nighthawk R7000 se encargará de distribuir la conexión de internet a varios dispositivos de manera alámbrica e inalámbrica, permitiendo que se conecten a la red y se comuniquen entre sí. También gestiona el tráfico de datos entre estos dispositivos y el router [35].

Características principales:

- Velocidad WiFi: Hasta 1900 Mbps (600 Mbps en 2.4GHz + 1300 Mbps en 5GHz).

- Puertos Ethernet: 4 puertos Gigabit Ethernet para conexiones LAN y 1 puerto WAN para conectar al módem satelital.
- Tecnología: Beamforming+ para mejorar la cobertura y el rendimiento WiFi.
- Seguridad: Funciones de seguridad avanzadas, incluyendo WPA/WPA2 y un firewall SPI.
- Facilidad de uso: Interfaz de usuario intuitiva y configuración sencilla mediante la aplicación Nighthawk.

3.10 Ancho de Banda de la Red

Tabla 16: Ancho de banda promedio por usuario [29].

Servicio	Capacidad
Correo electrónico	40 kbps
Navegación web	180 kbps
Redes sociales	180 kbps
Videoconferencias	256 kbps
Streaming de video SD	340 Mbps
Descargas	250 kbps
Reserva	125 kbps
Total	1371 kbps

Para calcular el ancho de banda es necesario considerar las aplicaciones que serán utilizadas y la capacidad requerida por cada una de ellas. En la Tabla 16 se toma el total de ancho de banda promedio por usuario que es de 1371 kbps.

El número total de dispositivos conectados a la red se determina con base en la población de estudio y el tamaño de la muestra. Asumiendo que el 50% de los usuarios estarán activos simultáneamente, se estima que habrá 190 usuarios conectados. Sin embargo, este valor no es exacto, ya que la mayoría de los usuarios se dedican a actividades agrícolas y ganaderas, lo que significa que no pasarán mucho tiempo en sus hogares, reduciendo así el factor de simultaneidad.

La capacidad de ancho de banda se calcula a partir del ancho de banda promedio requerido por cada usuario y la cantidad de usuarios simultáneos conectados al canal.

$$\begin{aligned}
 BW &= BWC/U * NUS \\
 BW &= 1371 \text{ kbps} * 72 \\
 BW &= 98.71 \text{ Mbps}
 \end{aligned}
 \tag{3.47}$$

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se analiza la viabilidad y factibilidad técnica del diseño de la red satelital VSAT planteado. Para llevar a cabo este análisis, se utilizarán herramientas de software como Matlab y GNS3, que permitirán simular, evaluar y probar el rendimiento del enlace y el sistema de comunicación satelital.

4.1 Generación y Visualización del Escenario

Para verificar los resultados, se utilizó la herramienta Satellite Communications Toolbox de Matlab, ideal para evaluar diversos parámetros especializados, como modelar y visualizar la órbita satelital y comprobar la disponibilidad y sensibilidad del enlace.

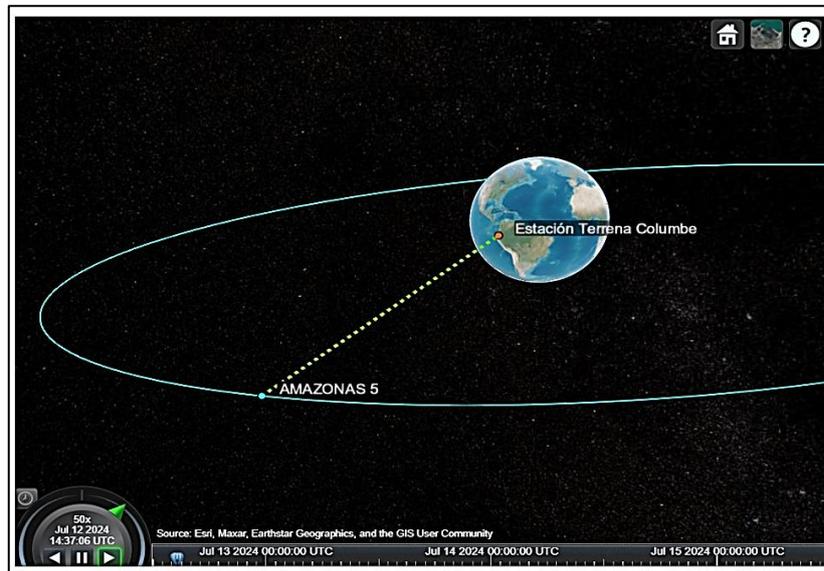


Figura 15:Desplazamiento orbital del satélite.

En la Figura 15 se observa el desplazamiento orbital en 3D del satélite Amazonas 5, ubicado en una órbita geoestacionaria (GEO) a una longitud de 61° oeste con una altitud de 35,786 km, cubriendo la zona donde se encuentra la estación terrena, con una longitud de -78.723506 y una latitud -1.887296 . Este satélite irradia un PIRE de 49 dBW, generando una huella de cobertura como se observa en la Figura 5. El desplazamiento del satélite sigue las especificaciones y parámetros proporcionados por el fabricante.

4.2 Análisis del Presupuesto de Enlace

En la Tabla 16 se presentan los resultados del presupuesto de enlace realizados mediante fórmulas y cálculos matemáticos, mientras que en la Tabla 17 se muestran los valores obtenidos utilizando la herramienta Satellite Link Budget Analyzer de Matlab. Al comparar ambos conjuntos de datos, se puede observar una alta concordancia entre los resultados, lo

que valida la precisión de los cálculos teóricos al ser corroborados con los resultados generados por la simulación.

Tabla 17: Resultados del presupuesto de enlace calculados.

Resultados Calculados		
Descripción	Valores enlace downlink	Valores enlace uplink
Potencia de salida del transmisor	40.60 dBW	33 dBW
EIRP	49 dBW	91 dBW
Perdidas en la trayectoria por el espacio libre	205.24 dB	206.5 dB
Densidad de potencia de portadora en la antena	-156.77 dBW	-116.03 dBW
Relación señal a densidad de ruido (C/No)	96.06 dB/Hz	117.87 dB/Hz
Relación de energía de bit a densidad de ruido (Eb/No)	15.72 dB	37.50 dB
Relación portadora a ruido (C/N)	21.28 dB	43.06 dB
Tasa de error de bit (BER)	$8.96 * 10^{-9}$	$2.012 * 10^{-18}$
Angulo azimut	84.658°	/
Ángulo de elevación	69.131°	
Distancia	36143.12 Km	
Densidad de flujo saturado (SDF)	-53.152 dBm/m ²	
Atenuación por lluvia	3.37 dBm/Km	
Pérdidas de propagación	209.34 dB	
Temperatura de ruido del sistema	75.2 K	
Figura de mérito	24.23 dB/K	

Tabla 18: Resultados del presupuesto de enlace con Satellite Link Budget Analyzer.

Tag	Name	L1	L2
N1	Distance (km)	3.6149e+04	3.6864e+04
N2	Elevation (deg)	68.9637	69.1687
N3	Tx EIRP (dBW)	91	49
N4	Polarization loss (dB)	3.0103	3.0103
N5	Free Space Path Loss FSPL (dB)	206.5322	205.3633
N6	Received isotropic power (dBW)	-116.0622	-156.8933
N7	C/No (dB-Hz)	117.8369	96.0558
N8	C/N (dB)	43.0657	21.2846
N9	Received Eb/No (dB)	37.5027	15.7216
N10	Margin (dB)	21.5027	9.7216
NC1	Gain Antenna Rx (dBi)	NaN	43.0115
NC2	Propagation losses (dB)	210.6322	209.4633
NC3	Saturated flux density (dB/m2)	-11.1540	-53.3240
NC4	G/T (dB/K)	5.3000	24.3500

NC5	C/T (dBW/K)	-110.7622	-132.5433
NC6	BER (unitless)	2.2780e+18	1.0133e+08

La Tabla 18 indica los resultados del presupuesto de enlace obtenidos mediante Satellite Link Budget Analyzer, en donde L1 es el enlace de subida (uplink) mientras que L2 es el enlace de bajada (downlink). Los resultados a tomar en cuenta para saber si la red satelital es factible son: relación portadora a ruido (C/N), relación señal a densidad de ruido (C/No), relación de energía por bit a densidad espectral de ruido (Eb/No), tasa de error de bits (BER) y margen de enlace.

La relación portadora a ruido en L1 es $C/N = 43.06$ dB y en L2 $C/N = 21.28$ dB. Los valores son más que apropiados, ya que para una modulación 8-PSK el mínimo recomendado es de 18.5 dB como se observa en la Figura 8. Los resultados están por encima del umbral mínimo, lo que sugiere que el enlace es viable.

La relación señal a densidad de ruido en L1 es $C/No = 117.83$ dB/Hz y en L2 $C/No = 96.05$ dB/Hz. Ambos valores son altos, lo que indica una excelente calidad de la señal en relación con el ruido, haciendo del enlace muy robusto y que pueda soportar interferencias o degradaciones sin comprometer la calidad de la señal.

La relación de energía por bit a densidad espectral de ruido es crucial para determinar si la modulación puede operar correctamente, para 8-PSK, el valor recomendado es 14 dB como se observa en la Figura 9. En ambos enlaces L1 $Eb/No = 37.50$ dB y L2 $Eb/No = 15.72$ dB, el valor es superior al mínimo requerido, lo que indica que el enlace debe ser capaz de soportar esta modulación sin problemas significativos.

La tasa de error de bits indica la calidad del enlace, para tener un enlace factible el valor de BER debe ser de mínimo 10^{-6} en 8-PSK. En los dos enlaces los valores son de L1 $BER = 2.012 \times 10^{-18}$ y L2 $BER = 8.96 \times 10^{-9}$ indicando un enlace muy estable con una tasa de error de bits prácticamente ideal.

Para el margen de enlace se recomienda tener un valor superior a 3 dB para garantizar la estabilidad del enlace frente a variaciones de las condiciones atmosféricas y de interferencia.

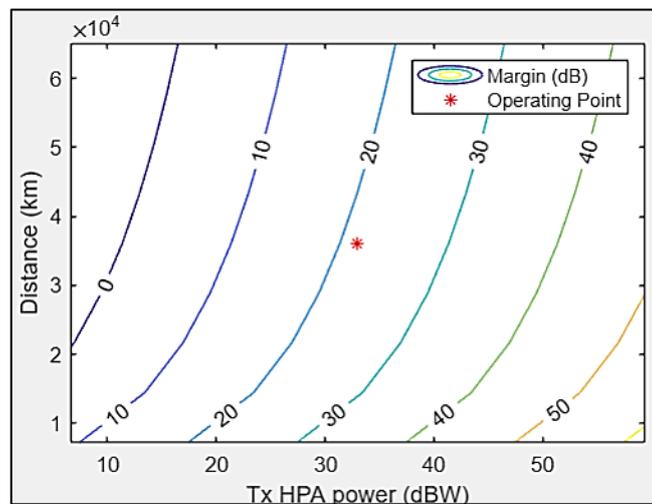


Figura 16: Margen de enlace de subida (uplink) L1.

En las Figuras 16 y 17 se muestra las curvas de nivel del margen de enlace en dB para L1 y L2 en función de la distancia (Km) y la potencia del amplificador de transmisión (HPA en dBW).

Las curvas con valores negativos indican que el enlace no es viable porque no hay suficiente margen para soportar el enlace de manera confiable.

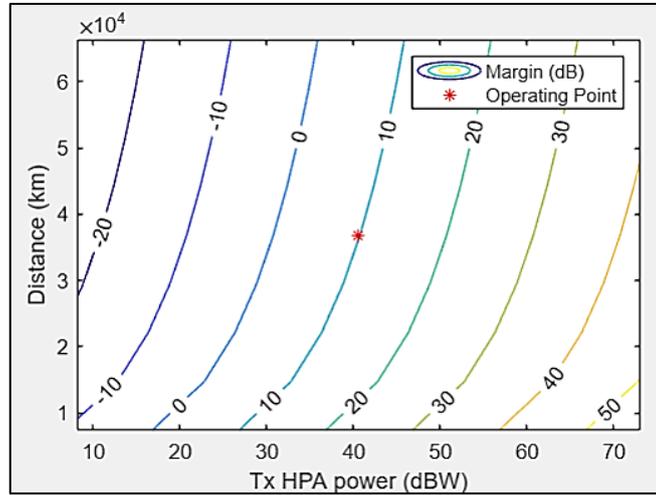


Figura 17: Margen de enlace de bajada (downlink) L2.

Las curvas con valores cercanos a 0 dB indican que el enlace está justo en el límite de viabilidad, es decir, el enlace es factible pero no hay margen para variaciones o degradaciones.

Las curvas con valores positivos representan enlaces cada vez más robustos, con suficiente margen para garantizar su estabilidad bajo condiciones adversas como el ruido, interferencias y degradaciones atmosféricas. Tanto L1 como L2 tienen su punto de operación de margen de enlace en 21.62 y 9.84 respectivamente, lo que indica un buen rendimiento.

4.3 Análisis Técnico – Económico

En la Tabla 19 se especifican los costos unitarios y totales asociados al suministro de los equipos y servicios necesarios para la instalación y el funcionamiento del proyecto.

Tabla 19: Costos de equipos e implementación de la red satelital VSAT.

Descripción	Cantidad	P. U. (USD)	Valor total
Unidad externa VSAT (ODU)			
Antena parabólica Norsat WAYFARER™ de 1,2 m	72	3205	230.760
LNB Norsat HS1047A	72	150	10.800
Cable coaxial por usuario	30 m	0.6/m	1.296
Unidad interna VSAT (IDU)			
Módem satelital SkyEdge II-c Gemini-e S2X	72	433	31.176
Punto de acceso Netgear Nighthawk R7000	72	68	4.896

Instalación			
Cable UTP por usuario	20 m	0.65/m	936
Conectores RJ-45 por usuario	5	0.25	90
Canaletas 2m Adhexiva 16x100 mm por usuario	5	3.15	680.4
Valor total de la inversión			280598.4 \$

El proyecto es viable desde el punto de vista técnico, ya que los equipos seleccionados, como las antenas Norsat y los módems SkyEdge II-c Gemini-e S2X, son capaces de manejar adecuadamente la demanda de tráfico, ofreciendo un ancho de banda suficiente, una latencia aceptable para aplicaciones básicas y una tasa de error dentro de los límites tolerables para una red VSAT. Estos parámetros aseguran que la red ofrecerá una experiencia de conectividad confiable, adecuada tanto para aplicaciones de comunicación esenciales como para el uso de internet general

Económicamente, el costo total de 280,598.4 USD para 72 usuarios, con un costo por usuario de aproximadamente 3,900 USD, es razonable considerando que la solución VSAT es una de las pocas opciones viables en áreas con baja o nula conectividad terrestre. Si se complementa con un modelo de financiamiento adecuado, ya sea mediante subvenciones, fondos públicos, o tarifas de suscripción que reflejen el valor del servicio ofrecido, la inversión inicial puede ser recuperada en un plazo razonable. Además, el impacto social en términos de acceso a la conectividad justifica la inversión, especialmente en contextos donde no hay alternativas viables.

4.4 Rendimiento de la Red

Finalmente, como se muestra en la Figura 18 (Anexo 3), se lleva a cabo la prueba de conectividad de la red satelital a través de una LAN, lo que permite evaluar su rendimiento. Utilizando el software GNS3, se configura un escenario con 72 dispositivos que conformarán la red local, con el fin de medir indicadores clave como la rapidez de carga y descarga, los tiempos de latencia y la tasa de error.

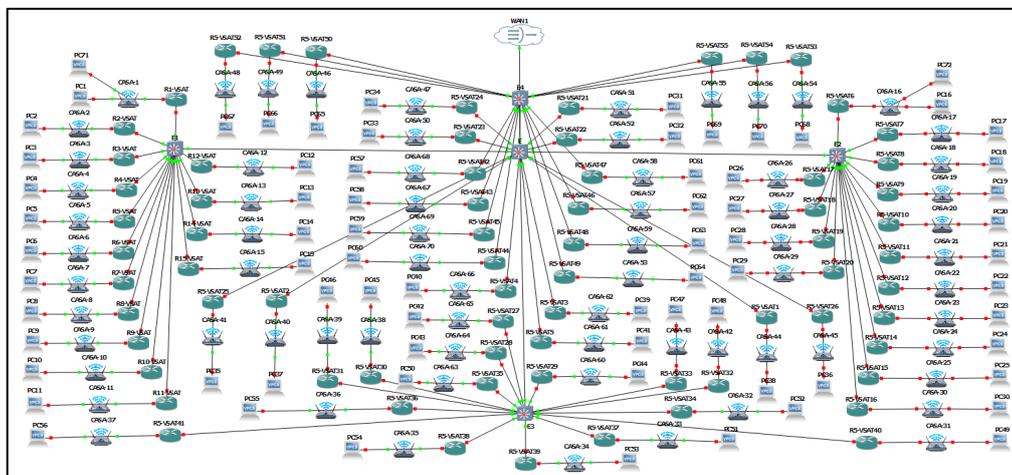


Figura 18: Escenario de simulación para probar el rendimiento de la red.

4.4.1 Prueba de Normalidad

Para determinar el tipo de prueba estadística a emplear en el análisis de los resultados, primero se realizará una prueba de normalidad de los datos. Mediante el software estadístico SPSS se aplica el test de Shapiro-Wilk para verificar si las distribuciones de los datos siguen o no siguen una distribución normal. Por lo que la hipótesis es la siguiente:

H_0 : Los datos de rapidez, latencia y tasa de error siguen una distribución normal.

H_a : Los datos de rapidez, latencia y tasa de error no siguen una distribución normal

Tabla 20: Pruebas de normalidad con el test de Shapiro-Wilk.

Test de Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	P-valor
Rapidez de carga en Mbps	.829	72	<.001
Rapidez de carga VSAT en Mbps	.963	72	.033
Rapidez de descarga en Mbps	.855	72	<.001
Rapidez de descarga VSAT en Mbps	.962	72	.029
Latencia en ms	.663	72	<.001
Latencia VSAT en ms	.987	72	.034
Tasa de error en %	.663	72	<.001
Tasa de error VSAT en %	.694	72	<.001

Como se observa en la Tabla 19, los datos no siguen una distribución normal, ya que el p-valor en todas las variables es menor a 0.05. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a). Esto indica que lo ideal es proceder con una prueba estadística no paramétrica.

4.4.2 Prueba de Wilcoxon

Para llevar a cabo el análisis no paramétrico, se emplea la prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas, ya que se está evaluando los datos obtenidos antes y después del diseño de la red satelital VSAT. Por lo que las hipótesis son las siguientes:

- Rapidez de carga:
 - H_0 : No hay mejoras significativas en la rapidez de carga de los usuarios.
 - H_a : Hay mejoras significativas en la rapidez de carga de los usuarios.
- Rapidez de descarga:
 - H_0 : No hay mejoras significativas en la rapidez de descarga de los usuarios.
 - H_a : Hay mejoras significativas en la rapidez de descarga de los usuarios.
- Latencia:
 - H_0 : No hay mejoras significativas en los tiempos de latencia de los usuarios.

H_a : Hay mejoras significativas en los tiempos de latencia de los usuarios.

- Tasa de error:

H_0 : No hay mejoras significativas en la tasa de error de los usuarios.

H_a : Hay mejoras significativas en la tasa de error de los usuarios.

Tabla 21: Prueba de Wilcoxon.

Indicador	N total	Estadístico de prueba	Error estándar	Estadístico de prueba estandarizado	P-valor
Rapidez de carga en Mbps	72	2628.000	178.199	7.374	<.001
Rapidez de descarga en Mbps	72	2628.000	178.199	7.374	<.001
Latencia en ms	72	8.000	178.199	-7.329	<.001
Tasa de error en %	72	76.000	176.083	-7.031	<.001

En la Tabla 20 se presentan los resultados de la prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas, los cuales revelan diferencias significativas entre los valores obtenidos antes y después del diseño la red satelital VSAT. Los p-valores para todas las variables evaluadas son inferiores a 0.05, lo que indica que se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a). Por lo tanto, se puede concluir que hay mejoras significativas en rapidez de carga, rapidez de descarga, latencia y tasa de error.

4.4.3 Diagrama de cajas

En el diagrama de cajas se visualiza directamente la distribución de los datos de antes y después del diseño de la red satelital VSAT en la parroquia Columbe evidenciando una mejora en la conectividad.

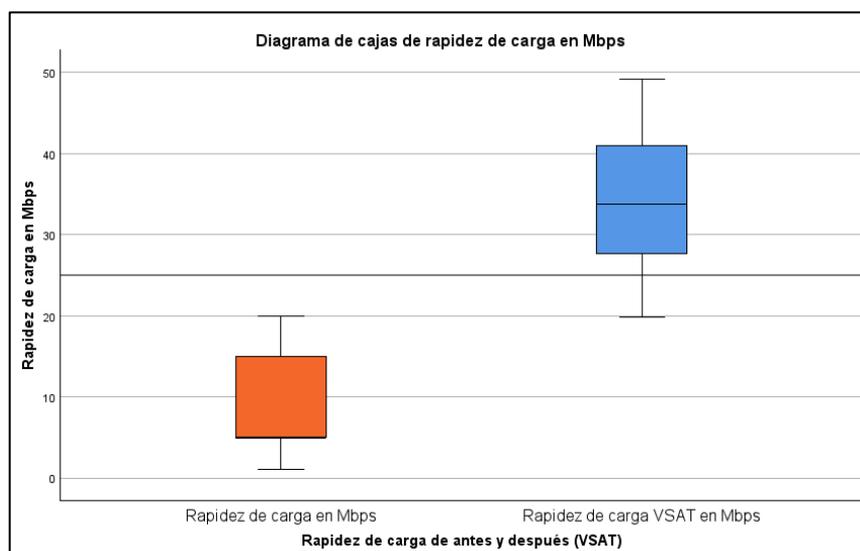


Figura 19: Diagrama de cajas de rapidez de carga en Mbps.

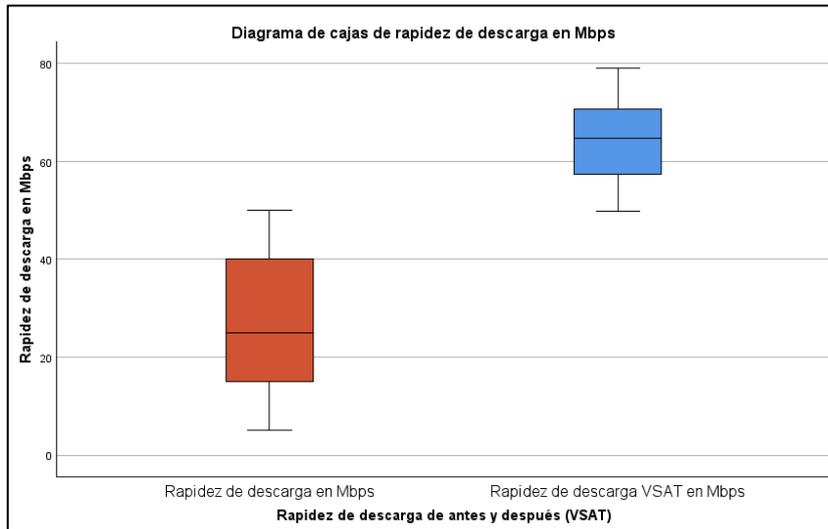


Figura 20: Diagrama de cajas de rapidez de descarga en Mbps.

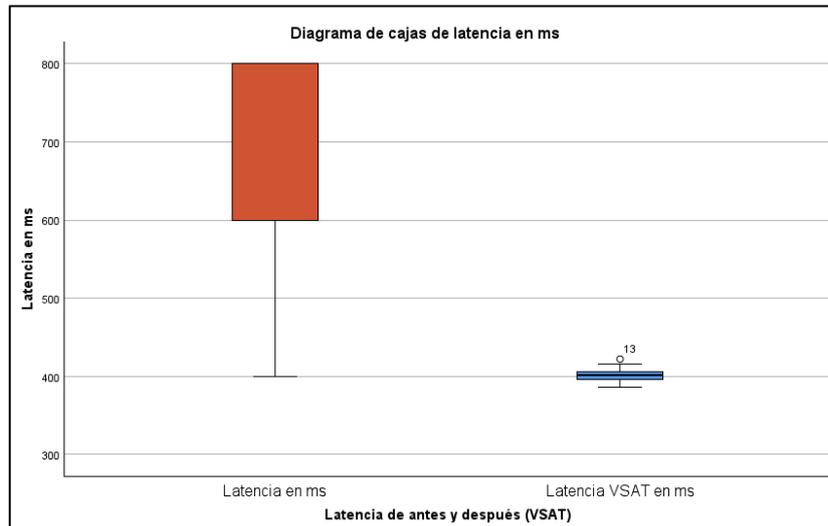


Figura 21: Diagrama de cajas de latencia en ms.

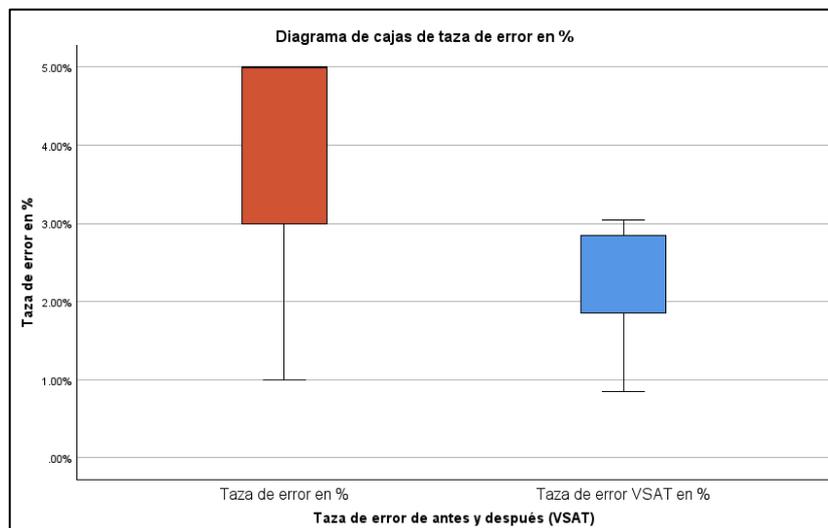


Figura 22: Diagrama de cajas de tasa de error en %.

En las Figuras 19, 20, 21 y 22 se observa un aumento significativo en la rapidez de carga y descarga, así como una notable reducción en los tiempos de latencia y la tasa de error. Estos gráficos permiten una comparación directa entre las condiciones previas y posteriores al diseño de la red satelital VSAT, mostrando de manera visual y concisa los beneficios que esta tecnología ha aportado a la comunidad de Columbe. La mejora en estos indicadores refleja el impacto positivo de la implementación de la red, contribuyendo a una conectividad más rápida y eficiente en la región.

4.4.4 Estudio de Correlación

Mediante el estudio de correlación de Spearman se plantea analizar como las variables de latencia y tasa de error influyen directamente con la rapidez de carga y descarga de la red. Por lo tanto, las hipótesis son:

- Latencia
 - H_0 : La latencia y la rapidez de carga no están correlacionadas.
 - H_a : La latencia y la rapidez de descarga están correlacionadas.
- Tasa de error
 - H_0 : La tasa de error y la rapidez de carga no están correlacionadas.
 - H_a : La tasa de error y la rapidez de descarga están correlacionadas.

Tabla 22: Correlación de Spearman antes.

Rho de Spearman antes		Rapidez de carga en Mbps	Rapidez de descarga en Mbps	Latencia en ms	Tasa de error en %
Rapidez de carga en Mbps	Coefficiente de correlación	1	-	-.717**	-.597**
	P-valor	-	-	<.001	<.001
	N	72	-	72	72
Rapidez de descarga en Mbps	Coefficiente de correlación	-	1	-.654**	-.567**
	P-valor	-	-	<.001	<.001
	N	-	72	72	72
Latencia en ms	Coefficiente de correlación	-.717**	-.654**	1	.845**
	P-valor	<.001	<.001	-	<.001
	N	72	72	72	72
Tasa de error en %	Coefficiente de correlación	-.597**	-.567**	.845**	1
	P-valor	<.001	<.001	<.001	-
	N	72	72	72	72

Tabla 23: Correlación de Spearman después.

Rho de Spearman después		Rapidez de carga VSAT en Mbps	Rapidez de descarga VSAT en Mbps	Latencia VSAT en ms	Tasa de error VSAT en %
Rapidez de carga VSAT en Mbps	Correlación de Pearson	1	-	-.693**	-.538**
	P-valor	-	-	<.001	<.001
	N	72	-	72	72
Rapidez de descarga VSAT en Mbps	Correlación de Pearson	-	1	-.689**	-.443**
	P-valor	-	-	<.001	<.001
	N	-	72	72	72
Latencia VSAT en ms	Correlación de Pearson	-.893**	-.689**	1	.704**
	P-valor	<.001	<.001	-	<.001
	N	72	72	72	72
Tasa de error VSAT en %	Correlación de Pearson	-.538**	-.543**	.704**	1
	P-valor	<.001	<.001	<.001	-
	N	72	72	72	72

En las Tablas 22 y 23 se presentan los resultados del estudio de correlación de Spearman para muestras no paramétricas los cuales revelan en los 2 casos que la latencia y la tasa de error tienen una correlación negativa tanto con la rapidez de carga como con la rapidez de descarga. Esto significa que a medida que la latencia y la tasa de error disminuyen, las rapidezces de carga y descarga aumentan, lo que indica que una menor latencia y tasa de error afecta positivamente al rendimiento de la red en términos de rapidez.

Los p-valores para todas las correlaciones evaluadas son inferiores a 0.05, lo que indica que se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_a). Por lo tanto, se puede concluir que la latencia y la tasa de error están correlacionadas con las rapidezces de carga y descarga.

Como observación la tasa de error tiene una correlación positiva fuerte con la latencia, lo que indica que una mayor latencia se asocia con una mayor tasa de error. Es decir, cuando la latencia aumenta, también lo hacen los errores en la red.

4.4.5 Prueba U de Mann-Whitney

Para concluir con el análisis, se aplica la prueba U de Mann-Whitney, la cual es adecuada para comparar las distribuciones de dos grupos de datos. En este caso, se analiza la diferencia entre los datos antes y después del diseño de la red satelital VSAT. Esta prueba es particularmente útil para evaluar cambios en las variables, permitiendo obtener conclusiones más robustas sobre el impacto de la propuesta. Por lo tanto, la hipótesis es:

H_0 : Con una red satelital VSAT no mejorará la conectividad ni resolverá las limitaciones actuales de telecomunicaciones en la parroquia Columbe.

H_a : Con una red satelital VSAT mejorará la conectividad y ayudará a superar las limitaciones de telecomunicaciones en la parroquia Columbe.

Tabla 24: Prueba U de Mann-Whitney.

	Rapidez de carga en Mbps	Rapidez de descarga en Mbps	Latencia en ms	Tasa de error en %
U de Mann-Whitney	12.000	22.000	200.000	360.000
W de Wilcoxon	2640.000	2650.000	2828.000	2988.000
Z	-10.373	-10.300	-9.742	-9.245
P-valor	<.001	<.001	<.001	<.001

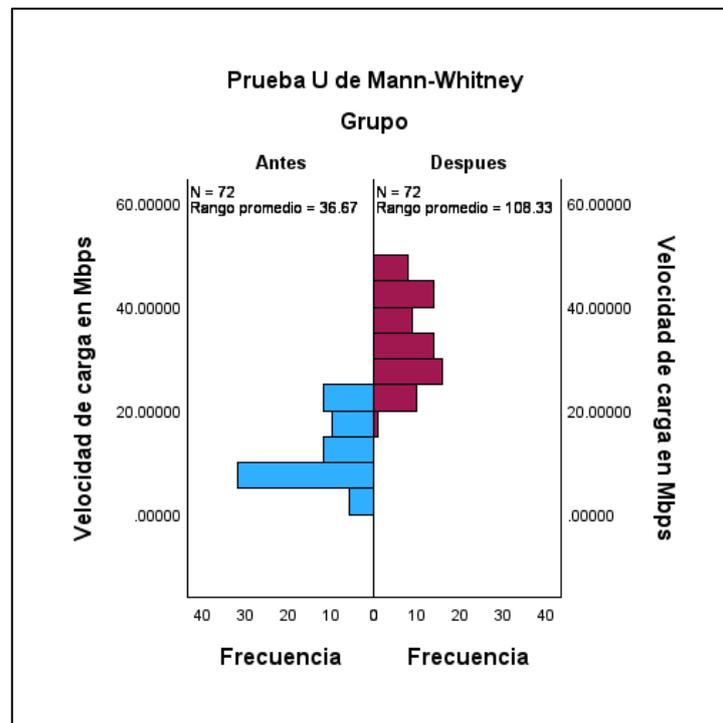


Figura 23: Barras apiladas de rapidez de carga.

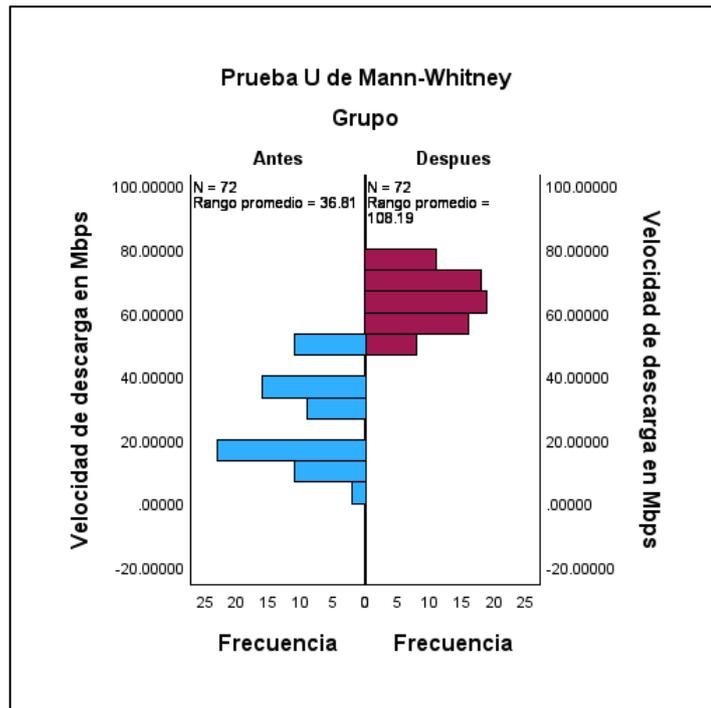


Figura 24: Barras apiladas de rapidez de descarga.

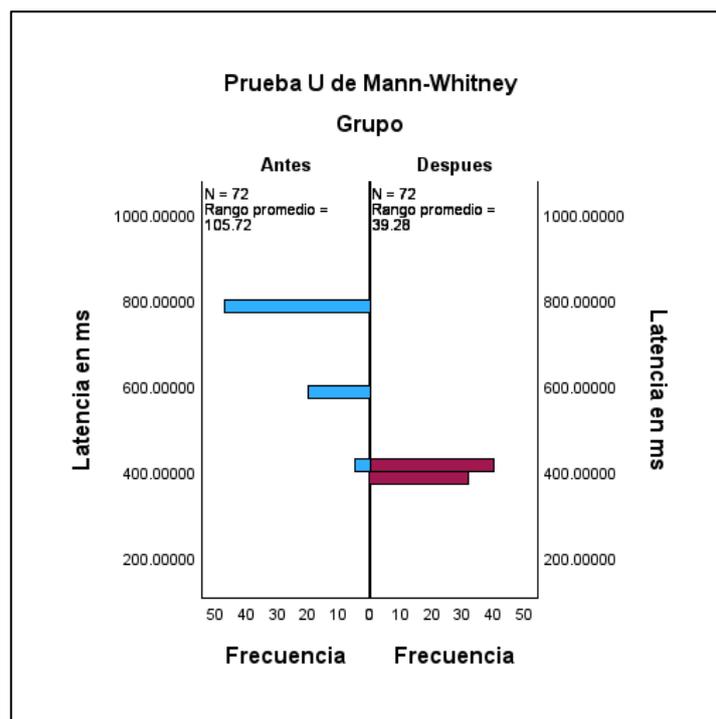


Figura 25: Barras apiladas de latencia.

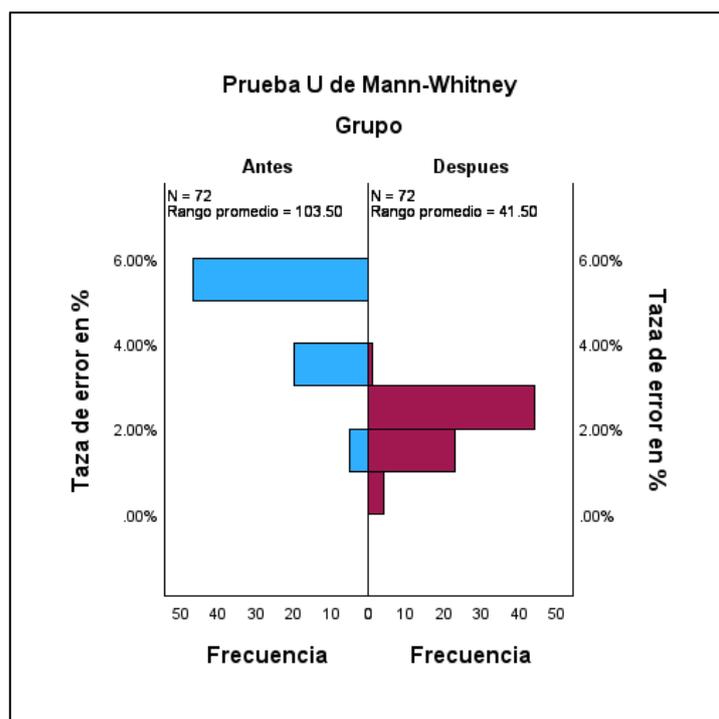


Figura 26: Barras apiladas de tasa de error.

Como se puede observar en la Tabla 24 y las Figuras 23 – 26 los P-valores son menores a 0.001 para todas las variables (rapidez de carga, rapidez de descarga, latencia y tasa de error), se puede rechazar la hipótesis nula (H_0). Esto sugiere que la red satelital VSAT sí mejora la conectividad y ayuda a superar las limitaciones de telecomunicaciones en la parroquia Columbe.

4.4.6 Porcentajes de Mejora

Mediante los análisis desarrollados se puede decir que existen unas mejoras significativas en la conectividad de la red, en la Tabla 25 se presentan los porcentajes de mejora:

Tabla 25: Porcentajes de mejora.

Variable	Mejora
Rapidez de carga	33.16%
Rapidez de descarga	35.28%
Latencia	21.76%
Tasa de error	21.19%

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El diseño de una red satelital con tecnología VSAT para la parroquia Columbe ha representado un avance importante con el desarrollo de este proyecto, cumpliendo con los objetivos planteados y ofreciendo una alternativa viable para mejorar las telecomunicaciones en comunidades rurales, donde las soluciones convencionales no suelen ser aplicables por su alto costo y dificultad de acceso.

Este proyecto ha demostrado que la tecnología VSAT es capaz de proporcionar la conectividad en zonas rurales. La capacidad de esta tecnología para adaptarse a velocidades requeridas en la actualidad junto con su robustez en entornos adversos, hace que sea una opción atractiva para áreas con acceso limitado a infraestructura de telecomunicaciones.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se ha llevado a cabo un análisis de las demandas de conectividad de los usuarios, ajustando el diseño de la red para satisfacer esas necesidades. Las simulaciones realizadas con MATLAB Y GNS3 han validado la factibilidad técnica del diseño y han permitido optimizar los parámetros de rendimiento, asegurando que se cumplan los requerimientos establecidos.

El análisis técnico y el diseño de la red VSAT se han llevado a cabo con un enfoque en el alto rendimiento de los equipos. Los cálculos realizados sobre parámetros críticos como C/N y Eb/No han sido validados mediante simulaciones, confirmando que la red puede ofrecer un buen desempeño con baja probabilidad de errores y alta eficiencia en la transmisión de datos. Además, el análisis técnico-económico asegura la viabilidad de implementar la red satelital en términos de costos y beneficios.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda dar continuidad a este trabajo de tesis, ya que, como en todo proyecto de investigación, surgen diversas áreas de estudio que pueden ser desarrolladas. Una posible línea de continuación sería la implementación total del sistema propuesto en la parroquia Columbe. Esto implicaría establecer la infraestructura necesaria para ofrecer conectividad a la comunidad, respondiendo a las necesidades tecnológicas actuales.

Además, este proyecto podría ampliarse a otras áreas rurales similares, llevando la solución de conectividad a más comunidades que también enfrentan limitaciones en el acceso a servicios de telecomunicaciones, contribuyendo así a la reducción de la brecha digital que afecta a los habitantes de estas zonas aisladas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Z. Cortés Cortés, «Diseño de una red de telecomunicaciones con acceso satelital de bajo costo para las poblaciones rurales», 2023.
- [2] O. León Viltre, «Dimensionamiento de redes VSAT», 2021.
- [3] F. J. Romero Arévalo y E. H. Orejuela Villanueva, «Utilización de VSAT en zonas alejadas del país», 2017, Accedido: 17 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/d9bf6f1a-e30c-4b22-877d-00f7dd8b960c/content>
- [4] L. Andreula, «Red de Comunicaciones Satelitales», 2018.
- [5] G. N. Ruiz Guzmán y J. L. Hermenegildo Beltran, «Aplicación de los sistemas VSAT a regiones remotas del territorio nacional», Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2013. Accedido: 19 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/497/1/T-UCSG-POS-MTEL-6.pdf>
- [6] G. A. Peñafiel Ricaurte y A. F. Espinosa Missura, «Implementación de enlaces de banda ancha usando tecnología satelital VSAT HughesNet (DirecWay) en Ecuador», UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO, Quito, 2010.
- [7] Y. I. Benítez Morejón, «Análisis prospectivo de las tecnologías de telecomunicaciones en Ecuador (escenario 2020) y diseño de estrategias para la Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT E.P.», 2014.
- [8] C. E. Armas Pérez y M. E. Camacho Zeas, «Propuesta para un plan de expansión de telecomunicaciones para sectores rurales y urbano marginales de las provincias de Napo y Orellana. Diseño de un modelo de negocios para su implementación», Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2011.
- [9] «Redes y Comunicaciones», Facultad de Ingeniería UAEMéx. Accedido: 25 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://fi.uaemex.mx/lineasAcentuacionICO/Red/index.html>
- [10] Á. R. Pachas Muchotrigo, «Sistema de Comunicación Satelital para efectivizar la atención de Emergencias y Desastres a Nivel Nacional en el Instituto Nacional de Defensa Civil», Universidad Peruana de Ciencias e Informática, Lima, 2020. Accedido: 26 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upci.edu.pe/bitstream/handle/upci/272/TRABAJO%20DE%20IN>

VESTIGACION%20-

%20Pachas%20Muchotrigo,%20%20%C3%81ngel%20Ra%C3%BAI.pdf?sequence=3

- [11] L. Andreula, «Red de Comunicaciones Satelitales», 2022.
- [12] J. A. Espinoza Baez, «Implementación de una estación terrena satelital VSAT con tecnología idirect para la estación biológica cocha cashu en la provincia del Manu departamento de Madre de Dios», UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR, Villa El Salvador, 2019.
- [13] A. E. Noa Ataypoma, «Modelo de Enlace Satelital para la Cobertura Móvil en la Localidad de Telapaccha – Acobambilla – Huancavelica», Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, 2018.
- [14] G. G. Melendez Servan, «Optimización de redes satelitales de datos mediante el uso de satélites de órbita baja», Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2021.
- [15] R. R. Fernández Rangel, «Diseño de sistemas de radiación tipo Isoflux para aplicaciones satelitales», Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Ensenada, Baja California, 2022.
- [16] S. E. Valencia Vargas, «Sistemas de Comunicación para la Transmisión de Datos del Sistema de Telemetría en la Propiedad de la Sra. Jaqueline García, Ubicada en la Parroquia San Antonio del Cantón Montalvo, Provincia de Los Ríos », Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2011.
- [17] G. N. Ruiz Guzmán y J. L. Hermenegildo Beltrán, «Aplicación de los Sistemas VSAT a Regiones Remotas del Territorio Nacional», Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2013.
- [18] G. M. Solano Aliaga, «Implementación e instalación de una antena satelital automática VSAT Intellian, en embarcaciones de la empresa Hayduk, para brindar servicio de datos de internet en altamar, en la empresa BMP Consulting SAC – Lima 2017», Universidad Tecnológica del Perú, Lima , 2020.
- [19] G. Santos L, «Redes de Acceso». Accedido: 27 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://acesogjsl.blogspot.com/2011/07/redes-vsate.html>
- [20] J. Cortez Green, «Desarrollo y Realización de un Subsistema de Enlace Ascendente con Aplicación Potencial en Comunicaciones Inalámbricas Satelitales y Espaciales en Banda X», dic. 2023, Accedido: 13 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/2487/1/CORTEZGJ_MCTE.pdf

- [21] ARCOTEL, «Satélites Autorizados para Operar en Ecuador». Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2024/06/Sate%CC%81lites-Autorizados-Mayo-2024.pdf>
- [22] D. Lakanchanh, P. Udomareyasap, N. Leelaruji, y N. Hemmakorn, «Propagation effect by rain in Ku and Ka band satellite communication system», *2022 International Symposium on Communications and Information Technologies, ISCIT*, pp. 970-973, 2022, doi: 10.1109/ISCIT.2006.339921.
- [23] ETSI, «Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)», 2021.
- [24] HISPASAT, «HISPASAT colabora con el gobierno de Ecuador en el cierre de su brecha digital con dos proyectos piloto de teleeducación y telemedicina vía satélite». Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hispasat.com/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/archivo-2021/424/hispasat-colabora-con-el-gobierno-de-ecuador-en-el-cierre-de-su-brecha-digital-con-dos-proyectos-piloto-de-teleeducacion-y-telemedicina-via-satelite>
- [25] R. Reda *et al.*, «Basic Principles and Mechanical Considerations of Satellites: A Short Review», *Transactions on Aerospace Research*, vol. 2023, n.º 3, pp. 40-54, sep. 2023, doi: 10.2478/TAR-2023-0016.
- [26] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), «Censo Nacional de Población y Vivienda 2022». Accedido: 3 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiDtL6k-MKGAXWzRDABHbEeEZYQFnoECBgQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.censoecuador.gob.ec%2Fwp-content%2Fuploads%2F2023%2F10%2F2022_CPV_NACIONAL_DENSIDAD_POBLACIONAL.xlsx&usg=AOvVaw2uMXgE9jhjbnDzZ3UK16A&opi=89978449
- [27] HISPASAT, «Amazonas 5». Accedido: 23 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hispasat.com/es/flota-de-satelites/amazonas-5>
- [28] J. D. Llerena Freire y J. J. Tandazo Vélez, «Evaluación de la Atenuación por Vegetación de una Onda Electromagnética Utilizando la Recomendación Itu-R P.833-10 en la Banda de 1.8 GHz para Bosques de Pino, Ciprés y Eucalipto en La Ciudad De Riobamba», 2023.

- [29] H. M. Segura Medranda, «Diseño de un Sistema Unidireccional Satelital para Difusión de Datos en la Escuela Rural Pedro Cornelio Druet », 2022.
- [30] W. J. Bravo López, «Estudio de TCP Sobre Enlaces Satelitales y del Estándar DVB Orientado a Aplicaciones De Transmisión de Datos», Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [31] Wayne. Tomasi, G. Mata Hernández, y V. González Pozo, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Pearson Educación, 2003.
- [32] VSATPLUS, «Norsat WFA120KU-NA WAYFARER 1.2m Ku-Band Auto Flyaway Antenna». Accedido: 26 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.vsatplus.com/products/copy-of-norsat-wfa120ku-uk-wayfarer-1-2m-ku-band-auto-flyaway-antenna?_pos=1&_sid=c4650395a&_ss=r
- [33] Norsat, «LNB PLL de banda única de banda Ku HS1000A». Accedido: 26 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.norsat.com/es/products/hs1000a-ku-band-single-band-pll-lnb?variant=41070808629431>
- [34] Gilat, «SkyEdge II-c Gemini-e S2X», Accedido: 26 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gilat.com/wp-content/uploads/2017/07/Gilat-Product-Sheet-%E2%80%93-SkyEdge-II-c-Gemini-e-S2X.pdf>
- [35] «NIGHTHAWK R7000 | AC1900 SMART WIFI ROUTER | NETGEAR SUPPORT». Accedido: 24 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.netgear.com/es/support/product/r7000/>

ANEXOS

Anexo 1: Código de Matlab.

```
% Crear un objeto de escenario de satélite
scenario = satelliteScenario;

% Datos TLE del satélite Amazonas 5
tleLines = [
    "AMAZONAS 5           "
    "1 42934U 17053A   24163.81993975 -.00000279  00000+0  00000+0 0  9992"
    "2 42934   0.0401  40.8273 0005174  22.2555  71.7212  1.00270256 24673"];

% Crear un archivo temporal para almacenar los datos TLE
filename = 'tle_temp.txt';
fid = fopen(filename, 'w');
fprintf(fid, '%s\n', tleLines);
fclose(fid);

% Añadir el satélite al escenario utilizando los datos TLE desde el archivo
sat = satellite(scenario, filename);

% Eliminar el archivo temporal después de añadir el satélite
delete(filename);

% Añadir una estación terrena en Columbe, Chimborazo, Ecuador
lat = -1.887296; % Latitud de Columbe
lon = -78.723506; % Longitud de Columbe
alt = 3000; % Altitud en metros
gs = groundStation(scenario, 'Name', 'Estación Terrena Columbe', 'Latitude',
    lat, 'Longitude', lon, 'Altitude', alt);

% Configurar la vista del escenario
viewer = satelliteScenarioViewer(scenario);

% Establecer el tiempo de inicio y fin del escenario
startTime = datetime(2024, 7, 12, 12, 0, 0);
stopTime = startTime + days(3);
scenario.StartTime = startTime;
scenario.StopTime = stopTime;

% Calcular los periodos de acceso entre el satélite y la estación terrena
accessPeriods = access(sat, gs);

% Visualizar el acceso en el Satellite Scenario Viewer
show(sat);
show(gs);
show(accessPeriods);

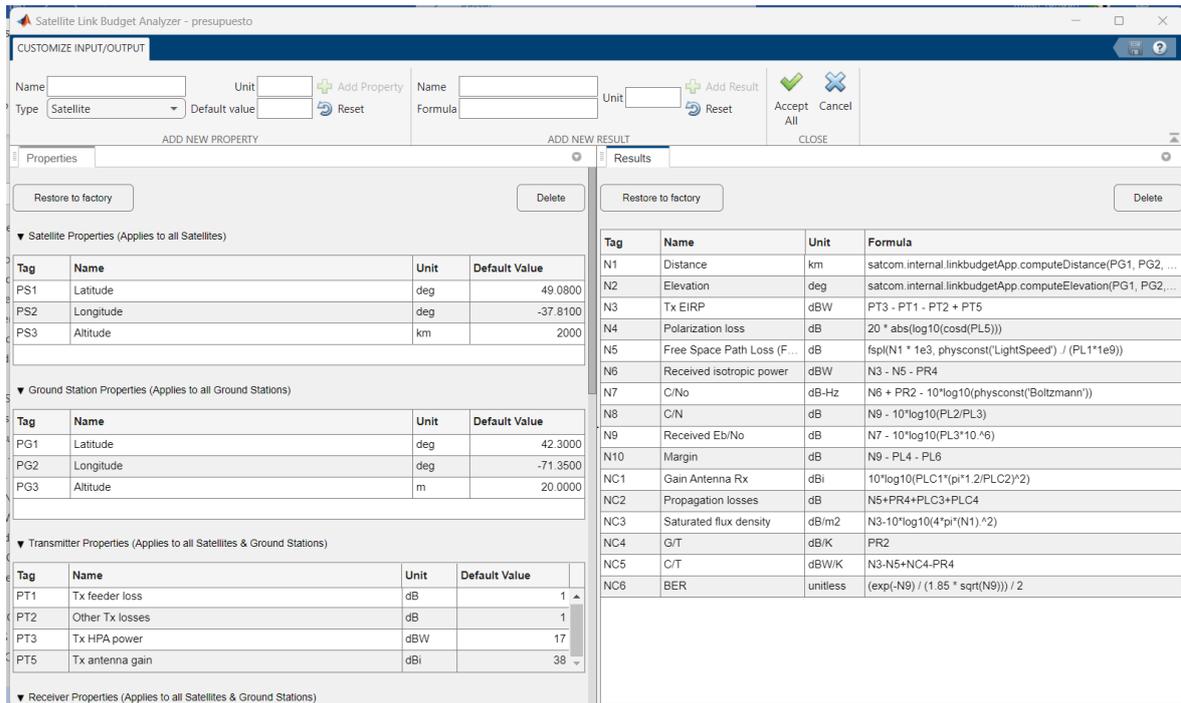
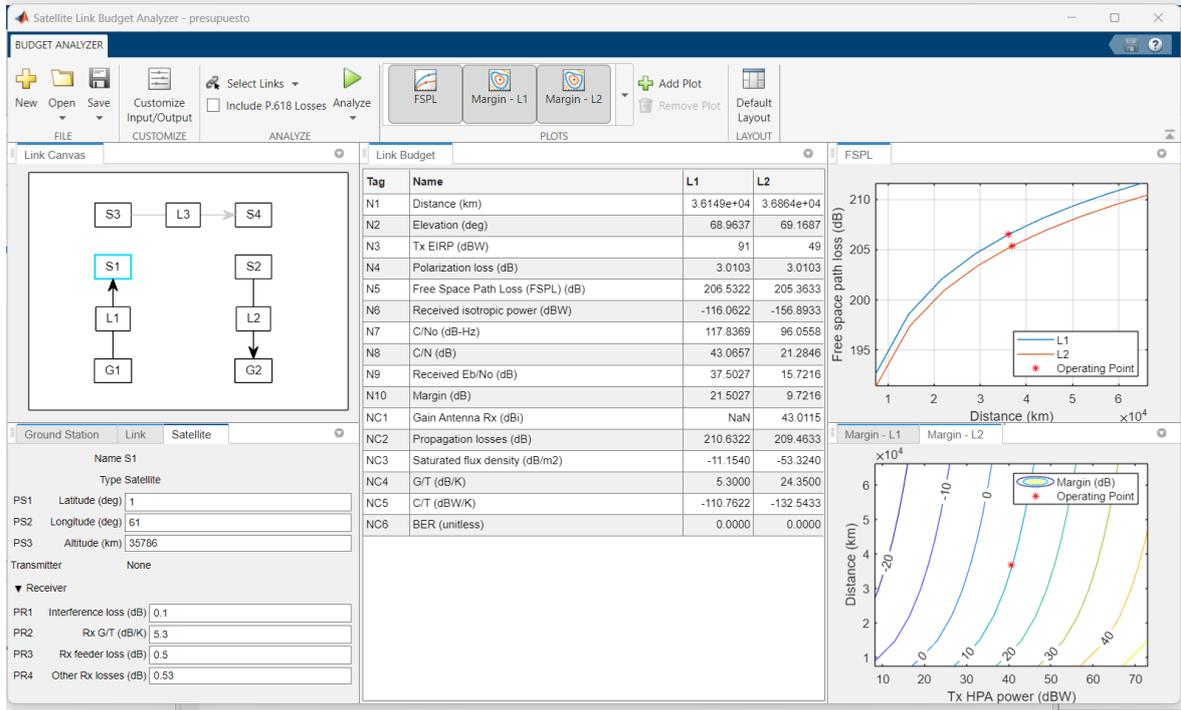
% Reproducir el escenario
play(scenario);

% Calcular la línea de vista (LoS)
accessIntervals = accessIntervals(accessPeriods);
losStatus = ~isempty(accessIntervals);
if losStatus
    disp('Línea de vista disponible entre la estación terrena y el satélite.');
```

```
    disp('No hay línea de vista entre la estación terrena y el satélite.');
```

```
end
```

Anexo 2: Interfáz Satellite Link Budget Analyzer y configuraciones.



Satellite Link Budget Analyzer - presupuesto

CUSTOMIZE INPUT/OUTPUT

Name: Unit: Add Property Name: Unit: Add Result Accept All Cancel

Type: Default value: Reset Formula: Reset ADD NEW RESULT

ADD NEW PROPERTY

Properties	Tag	Name	Unit	Default Value
PG1	Latitude	deg		42.3000
PG2	Longitude	deg		-71.3500
PG3	Altitude	m		20.0000

▼ Transmitter Properties (Applies to all Satellites & Ground Stations)

Tag	Name	Unit	Default Value
PT1	Tx feeder loss	dB	1
PT2	Other Tx losses	dB	1
PT3	Tx HPA power	dBW	17
PT5	Tx antenna gain	dBi	38

▼ Receiver Properties (Applies to all Satellites & Ground Stations)

Tag	Name	Unit	Default Value
PR1	Interference loss	dB	2
PR2	Rx G/T	dB/K	25
PR3	Rx feeder loss	dB	1
PR4	Other Rx losses	dB	1

▼ Link Properties (Applies to all Links)

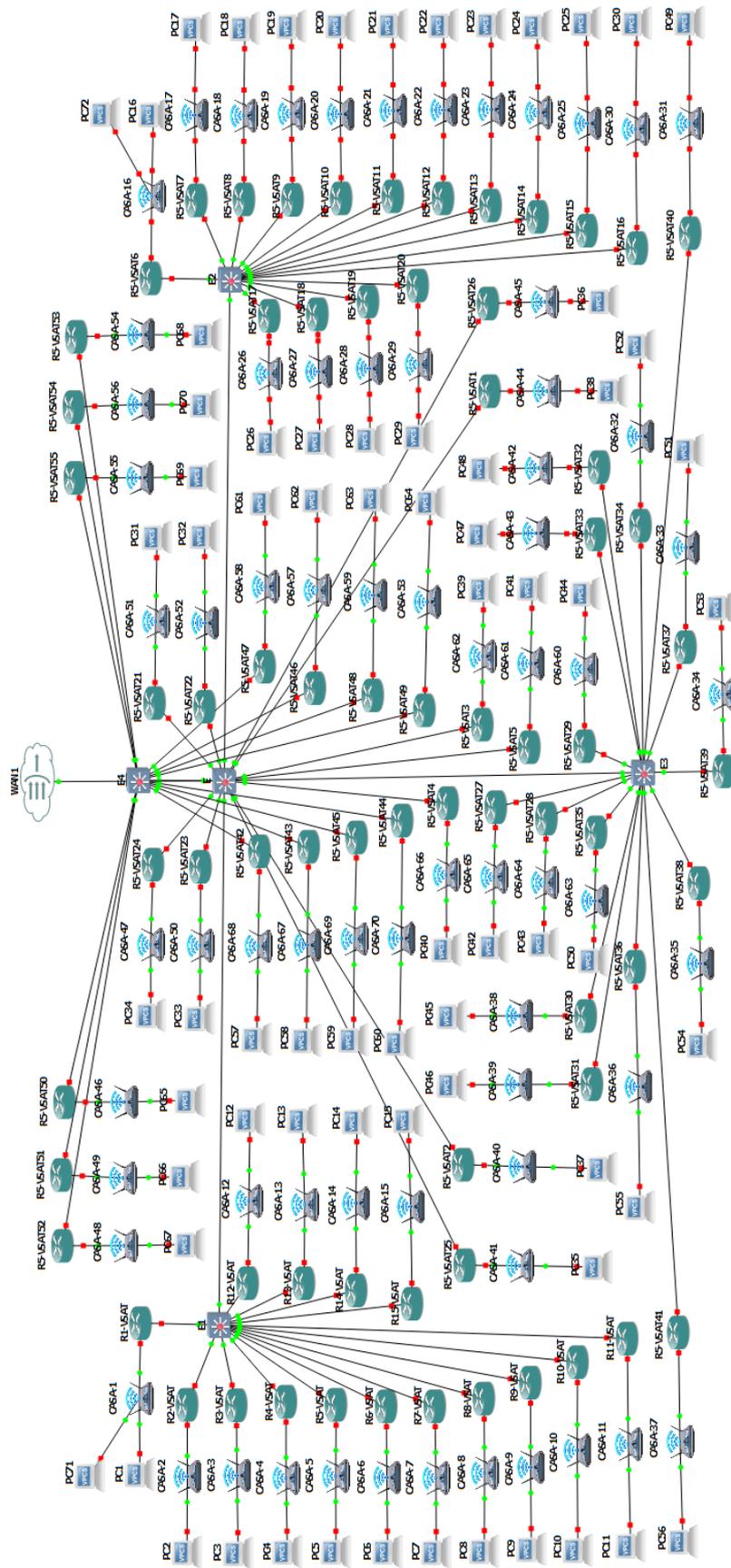
Tag	Name	Unit	Default Value
PL1	Frequency	GHz	14
PL2	Bandwidth	MHz	6
PL3	Bit rate	Mbps	10
PL4	Required Eb/No	dB	10

Results

Restore to factory Delete

Tag	Name	Unit	Formula
N1	Distance	km	satcom.internal.linkbudgetApp.computeDistance(PG1, PG2, ...
N2	Elevation	deg	satcom.internal.linkbudgetApp.computeElevation(PG1, PG2, ...
N3	Tx EIRP	dBW	PT3 - PT1 - PT2 + PT5
N4	Polarization loss	dB	20 * abs(log10(cosd(PL5)))
N5	Free Space Path Loss (F...	dB	fsp((N1 * 1e3, physconst("LightSpeed")) / (PL1*1e9))
N6	Received isotropic power	dBW	N3 - N5 - PR4
N7	C/No	dB-Hz	N6 + PR2 - 10*log10(physconst("Boltzmann"))
N8	C/N	dB	N9 - 10*log10(PL2/PL3)
N9	Received Eb/No	dB	N7 - 10*log10(PL3*10^6)
N10	Margin	dB	N9 - PL4 - PL6
NC1	Gain Antenna Rx	dBi	10*log10(PLC1*(pi^1.2/PLC2)^2)
NC2	Propagation losses	dB	N5+PR4+PLC3+PLC4
NC3	Saturated flux density	dB/m2	N3-10*log10(4*pi*(N1)^2)
NC4	G/T	dB/K	PR2
NC5	C/T	dBW/K	N3-N5+NC4-PR4
NC6	BER	unitless	(exp(-N9)) / (1.85 * sqrt(N9)) / 2

Anexo 3: Topología de red LAN con GNS3.



Anexo 4: Software PRTG, utilizado para la recolección de datos.

