

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Escuela de Posgrado



Diseño y Evaluación Técnica de Redes de Comunicación de Internet de las Cosas en Ambientes Remotos de Montaña. WIFI-LPWAN vs M2M-IoT Satelital.

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería de las Telecomunicaciones que presenta:

Robert Alfredo Alvarado Lugo

Asesor:

Dr. Guido Silva Mondragón

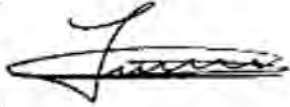
Lima, 2025

Informe de Similitud

Yo, Guido Silva Mondragón, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada "Diseño y Evaluación Técnica de Redes de Comunicación de Internet de las Cosas en Ambientes Remotos de Montaña. WIFI-LPWAN vs M2M-IoT Satelital", del autor Robert Alfredo Alvarado Lugo, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 18%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 08/08/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 18 de agosto de 2025

Apellidos y nombres del asesor:	Silva Mondragón, Guido Leonardo
DNI: 74929406	Firma
ORCID: 0000-0003-0099-8707	



Dedicatoria

A las personas que viven en latitudes olvidadas del Perú.



Agradecimientos

A mi hermosa familia Lau y Domi por su paciencia.

Al doctor Guido Silva Mondragón por su apoyo y mentoría.



Resumen

El monitoreo de variables ambientales en regiones montañosas del Perú representa un desafío técnico y económico, debido a la limitada infraestructura de telecomunicaciones presente en estas áreas. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo comparar el rendimiento y los costos asociados a dos tecnologías de comunicación inalámbrica: una red híbrida WiFi-LPWAN y una red satelital M2M-IoT. El análisis se centra en la velocidad de transmisión de datos, así como en los costos de implementación, operación y mantenimiento. El estudio inicia con una revisión de literatura, identificando antecedentes tanto a nivel nacional (e.g., Cusco y Áncash) como internacional (e.g., Nepal e India). Posteriormente, se evalúa el desempeño de ambas tecnologías en un entorno simulado correspondiente a la laguna Arhuaycocha, en la cordillera Blanca. Para el diseño de la red WiFi-LPWAN se utilizaron modelos de propagación semiempíricos como Okumura-Hata, COST231-Hata e ITU-R P.1546, mientras que para la red M2M-IoT satelital se empleó el modelo de pérdida de trayectoria libre. Se calculó la atenuación de la señal, la relación señal-ruido (SNR) y la velocidad de transmisión de datos. Los resultados muestran que es posible alcanzar velocidades teóricas mínimas de 4.3 kbps para WiFi-LPWAN y de 133.5 kbps para M2M-IoT satelital, considerando un ancho de banda de 125 kHz. En cuanto al consumo energético, se encontró que la red LPWAN requiere solo el 14.6 % del consumo energético necesario para el segmento satelital. Respecto a la disponibilidad, LPWAN alcanza un valor promedio del 81 %, mientras que M2M-IoT satelital alcanza un 99.9 %. Asimismo, se identificó que la planificación de cobertura es ligeramente más favorable para la red satelital. Además, se evaluó la viabilidad económica de ambas tecnologías en un escenario de monitoreo en tiempo real de la laguna peligrosa Arhuaycocha. Los resultados indican que, en términos de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), la red M2M-IoT satelital resulta más eficiente económicamente. No obstante, para aplicaciones que requieren transmisión continua de datos, como el monitoreo ambiental de lagunas peligrosas, la red WiFi-LPWAN se posiciona como la opción más adecuada por su mayor flexibilidad y capacidad de transmisión sin restricciones asociadas a planes de datos y su menor consumo energético. Finalmente, los resultados de este estudio contribuyen a comprender el impacto de las telecomunicaciones en la gestión de problemas ambientales emergentes relacionados con el cambio climático.

Abstract

The monitoring of environmental variables in mountainous regions of Peru represents a technical and economic challenge, due to the limited telecommunications infrastructure present in these areas. In this context, the present research aims to compare the performance and costs associated with two wireless communication technologies: a hybrid WiFi-LPWAN network and an M2M-IoT satellite network. The analysis focuses on data transmission speed, as well as implementation, operation and maintenance costs. The study begins with a literature review, identifying antecedents at both national (e.g., Cusco and Ancash) and international (e.g., Nepal and India) levels. Subsequently, the performance of both technologies is evaluated in a simulated environment corresponding to the Arhuaycocha lake, in the Cordillera Blanca mountain range. Semi-empirical propagation models such as Okumura-Hata, COST231-Hata and ITU-R P.1546 were used for the design of the WiFi-LPWAN network, while the free path loss model was used for the satellite M2M-IoT network. Signal attenuation, signal-to-noise ratio (SNR) and data rate were calculated. The results show that it is possible to achieve minimum theoretical rates of 4.3 kbps for WiFi-LPWAN and 133.5 kbps for satellite M2M-IoT, considering a bandwidth of 125 kHz. Regarding energy consumption, it was found that the LPWAN network requires only 14.6% of the energy consumption needed for the satellite segment. Regarding availability, LPWAN achieves an average value of 81%, while satellite M2M-IoT achieves 99.9%. It was also identified that coverage planning is slightly more favorable for the satellite network. In addition, the economic viability of both technologies was evaluated in a real-time monitoring scenario of the Arhuaycocha hazardous lagoon. The results indicate that, in terms of Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR), the satellite M2M-IoT network is more economically efficient. However, for applications that require continuous data transmission, such as environmental monitoring of dangerous lagoons, the WiFi-LPWAN network is positioned as the most suitable option due to its greater flexibility and transmission capacity without restrictions associated with data plans and its lower energy consumption. Finally, the results of this study contribute to understanding the impact of telecommunications on the management of emerging environmental problems related to climate change.

Índice general

Informe de Similitud

Dedicatoria

Agradecimiento

Resumen

Abstract

1. Introducción	1
1.1. Establecimiento del Problema	1
1.1.1. Efectos del cambio climático en el Perú	1
1.1.2. Riesgos de las Montañas Andinas	2
1.1.3. El Peligro de las Lagunas Andinas	4
1.1.4. Brecha de Telecomunicaciones	5
1.2. Problema de Investigación	6
1.3. Objetivos de la Investigación	7
1.3.1. Objetivo General	7
1.3.2. Objetivos Específicos	7
1.4. Justificación	7
1.4.1. Conveniencia	7
1.4.2. Relevancia Social	8
1.4.3. Implicaciones practicas	8
1.4.4. Valor teórico	8
1.5. Viabilidad de la Investigación	9
1.6. Antecedentes	9
1.6.1. Prevención de desastres naturales en lagunas: Medidas y estrategias	10
1.6.2. Sistema de alerta temprana 513	10
1.6.3. Sistema de Monitoreo de la laguna Palcacocha	12
1.6.4. Sistema de alerta temprana laguna Palcacocha	13
1.6.5. Sistema de alerta temprana en los Andes Tropicales	14
1.6.6. Sistema de alerta temprana en los Himalayas, Nepal	15
1.6.7. Sistemas de Alerta Temprana en los Himalayas, India	16
2. Marco Teórico	18
2.1. Tendencia en las Comunicaciones Inalámbricas	18
2.2. Internet de las Cosas	19

2.3.	LPWAN	20
2.4.	Topologías y Arquitecturas LPWAN	21
2.4.1.	Topologías LPWAN	21
2.4.2.	Arquitectura estándar LPWAN	22
2.4.3.	Arquitectura híbrida LPWAN	23
2.5.	Tecnologías LPWAN	25
2.5.1.	LoRa y LoRaWAN	25
2.5.2.	Sigfox	26
2.5.3.	NB-IoT	27
2.5.4.	Ingenu	27
2.5.5.	Telensa	27
2.5.6.	Qowisio	28
2.5.7.	Nwave	28
2.5.8.	Weightless	28
2.5.9.	LTE-M	29
2.5.10.	DASH7	29
2.5.11.	NB-Fi	30
2.5.12.	EC-GSM-IoT	30
2.5.13.	IEEE 802.15.4k	31
2.6.	Análisis de soluciones IoT	31
2.6.1.	Solución basada en LoraWAN	31
2.6.2.	Solución basada en SigFox	33
2.6.3.	Solución basada en NB-IoT	34
2.6.4.	Comparación entre Sigfox, LoraWAN y NB-IoT	35
2.7.	Aplicaciones LPWAN	36
2.8.	Tecnología WiFi	37
2.8.1.	Bandas de Frecuencia	37
2.8.2.	Modulación	38
2.8.3.	Seguridad	38
2.8.4.	Interferencias	39
2.8.5.	Alcances	41
2.9.	Comunicación Satelital	42
2.9.1.	Tendencias en la comunicación satelital	42
2.9.2.	Comunicación Maquina a Maquina (M2M)	43
2.9.3.	Estado situacional del mercado de bienes y servicios satelitales M2M-IoT	44
2.9.4.	Aplicaciones de M2M/IoT Satelital	48
3.	Diseño	50
3.1.	Lugar de estudio	50
3.2.	Análisis de accesibilidad geográfica	51
3.3.	Análisis de vegetación en la zona	52
3.4.	Sensores de medición de variables ambientales	53
3.4.1.	Sensor del nivel de espejo de agua	53
3.4.2.	Sensor de deslizamiento de masa glaciar	55
3.4.3.	Sensores meteorológicos	57
3.5.	Estimación del peso digital de los datos	59
3.5.1.	Carga útil (Payload)	59

3.5.2.	Cabecera (Header)	60
3.5.3.	Peso digital absoluto	60
3.5.4.	Demanda de la velocidad de transmisión de datos	60
3.6.	Consideraciones técnicas para la ubicación de los sensores ambientales .	62
3.6.1.	Criterios de espaciales	62
3.6.2.	Consideraciones para los Sensores de Nivel de Espejo de Agua (SNEA)	62
3.6.3.	Consideraciones para los Sensores de Deslizamiento de Masas (SDM)	63
3.6.4.	Consideraciones para los Sensores Meteorológicos (SM)	64
3.6.5.	Elección de la Ubicación de los Sensores Ambientales	66
3.7.	Diseño de la red WIFI-LPWAN	67
3.7.1.	Topología de la red WIFI-LPWAN	67
3.7.2.	Ubicación del Gateway LPWAN	67
3.7.3.	Especificaciones técnicas del Gateway LPWAN	68
3.7.4.	Estimación de la cobertura espacial del Gateway LPWAN	69
3.7.5.	Oferta de la velocidad de transmisión de datos LPWAN	84
3.8.	Diseño de la red de transporte WIFI	86
3.9.	Diseño de la red M2M-IoT Satelital	91
3.9.1.	Ubicación del Gateway M2M-IoT Satelital	91
3.9.2.	Cálculo de la cobertura del M2M-IoT Satelital	93
3.9.3.	Características técnicas del transmisor/receptor Satelital M2M-IoT .	94
3.9.4.	Cálculo de la potencia de recepción satelital	95
3.9.5.	Estimación de la Pérdida de Trayectoria Libre (FSPL)	96
3.9.6.	Cálculo relación señal ruido (SNR) en el segmento M2M-IoT Satelital	100
3.9.7.	Oferta de la velocidad de transmisión de datos M2M-IoT Satelital .	101
3.10.	Estimación de la provisión energética	102
3.10.1.	Equipos	102
3.10.2.	Cálculo del consumo energético diario	104
3.10.3.	Dimensionamiento de baterías y paneles solares	108
4.	Evaluación Económica	111
4.1.	Identificación de costos	111
4.1.1.	Costos iniciales	111
4.1.2.	Costos operativos	116
4.2.	Escenario de análisis económico	117
4.3.	Análisis Cuantitativo	118
4.3.1.	Valor Presente Neto de la solución WIFI-LPWAN	119
4.3.2.	Valor Presente Neto de la solución IoT-M2M Satelital	120
5.	Análisis Técnico Económico	122
5.1.	WIFI-LPWAN	122
5.1.1.	Ventajas	122
5.1.2.	Desventajas	123
5.2.	M2M-IoT Satelital	124
5.2.1.	Ventajas	124
5.2.2.	Desventajas	125

6. Conclusiones	126
7. Trabajos Futuros	129
Bibliografía	130



Índice de tablas

2.1. Cuadro comparativo de tecnologías de solución. Fuente: Elaboración propia.	36
2.2. Primeras 30 empresas del mercado satelital que cuentan con infraestructura propia.	48
2.3. Empresas prestadoras de servicios finales IoT-M2M satelital.	49
3.1. Tipos de sensores de nivel de espejo de agua empleados en el estudio. .	54
3.2. Especificaciones Técnicas de los sensores de nivel de espejo de agua de tipo radar y presión.	55
3.3. Especificaciones técnicas de un sensor comercial de cuerda vibrante junto con el datalogger y gateway compatible.	57
3.4. Estimación del peso digital en bytes que generan los sensores ambientales a una frecuencia de medición de un minuto. La columna "peso máximo del payload" se determinó reemplazando el valor registrado (<i>value</i>) con los valores máximos del rango de medición de cada sensor.	59
3.5. Tamaño típico de la cabecera para diferentes tecnologías. La estimación del peso de la cabecera para la tecnología M2M-IoT Satelital se obtuvo utilizando la herramienta Messenger ORBCOMM.	60
3.6. Peso digital absoluto de los datos generados por los sensores ambientales.	60
3.7. Conversión del peso digital de Bytes a Bits por tipo de valor registrado.	61
3.8. Demanda de velocidad de transmisión de datos para los sensores por tipo de red.	61
3.9. Ubicación geográfica de los sensores ambientales.	66
3.10. Ubicación geográfica del Gateway LPWAN.	68
3.11. Características técnicas del gateway de comunicaciones UG67 de la marca Milesight.	69
3.12. Diseño de experimentos y parámetros de configuración utilizados para el cálculo de atenuación.	71
3.13. Potencias recibidas en la primera simulación para los tres modelos, ordenadas según la distancia de separación al Gateway LPWAN.	80
3.14. Sensibilidad del chip LoRa SX1302 según el factor de dispersión (SF). .	81
3.15. Fade margin ($FM = P_{rx} - (-140\text{dBm})$) y potencias recibidas para los tres modelos.	81
3.16. Modelo Okumura-Hata – Probabilidad de outage y disponibilidad del sistema para cada sensor, con $\sigma = 8$ dB.	82
3.17. Modelo COST231-Hata – Probabilidad de outage y disponibilidad del sistema para cada sensor, con $\sigma = 8$ dB.	83

3.18. Modelo ITU-R P1546 – Probabilidad de outage y disponibilidad del sistema para cada sensor, con $\sigma = 8$ dB.	83
3.19. Relación Señal Ruido (SNR) para diferentes modelos de propagación utilizando un ruido de fondo de -123 dBm.	84
3.20. Capacidad de canal (kbps) calculada con la fórmula de Shannon-Hartley para un ancho de banda de 125 kHz y SNR obtenida con ruido de fondo de -123 dBm.	85
3.21. Características técnicas de la radio de comunicación PowerBeam 5AC-300 de la marca Ubiquiti. La radio y la antena se encuentran integradas en un único equipo.	87
3.22. Parámetros de conexión PtP del enlace entre la Base y el nodo repetidor 1 (REP1).	88
3.23. Parámetros de conexión PtP del enlace entre la repetidor 1 y 2 (Rep1 y Rep2).	88
3.24. Parámetros y resultados de conexión PtP del enlace entre la repetidor 2 y 3 (Rep2 y Rep3).	89
3.25. Parámetros y resultados de conexión PtP del enlace entre la repetidor 3 y final (Rep3 y Final).	90
3.26. Posición orbital de los satélites Inmarsat I-3 F5 Inmarsat I-4 F3.	93
3.27. Características técnicas del terminal ST6100 de Orbcomm.	95
3.28. Estimación del voltaje y consumo eléctrico de los sensores ambientales.	103
3.29. Estimación del voltaje y consumo eléctrico del registrado de datos.	103
3.30. Estimación del voltaje y consumo eléctrico de los transmisores.	103
3.31. Consumo energético diario por componente para cada tipo de red usando el sensor SNEA.	106
3.32. Consumo energético diario por componente para cada tipo de red usando el sensor SDM.	107
3.33. Consumo energético diario por componente para cada tipo de red usando el sensor SM.	108
3.34. Consumo energético diario por tipo de red para cada sensor.	109
3.35. Capacidad de batería requerida para 3 días de autonomía y una profundidad de descarga (DoD) del 60 %.	109
3.36. Capacidad mínima del panel solar para diferentes sensores y tipos de red, considerando 4 horas de sol pico y una eficiencia del 20 %.	110
4.1. Estimación de precios de los sensores ambientales.	112
4.2. Estimación de precios de los equipos e insumos para la implementación del sistema de radioenlaces WiFi.	113
4.3. Estimación de precios del equipamiento necesario para implementar una red LPWAN empleando un gateway y siete controladores IoT. Cada controlador se conecta al registrador de datos de los sensores.	113
4.4. Estimación de costos para la instalación de los sensores ambientales en el segmento de red LPWAN-WIFI.	114
4.5. Estimación de precios de los transmisores satelitales M2M-IoT Satelital.	115
4.6. Estimación de costos de instalación de los transmisores M2M-IoT Satelital en los 7 puntos de ubicación de los sensores ambientales.	115
4.7. Estimación de los costos de mantenimiento anual de los sensores ambientales.	116

4.8. Estimación de los costos operativos anuales de la red WIFI-LPWAN.	116
4.9. Estimación de los costos operativos anuales de la red M2M-IoT Satelital.	117
4.10. Resumen de costos de inversión para la implementación de la red WIFI-LPWAN.	119
4.11. Flujo neto anual de la red WIFI-LPWAN.	119
4.12. Resumen de flujo de cada anual.	120
4.13. Costos de inversión para la implementación de la red M2M-IoT Satelital.	120
4.14. Flujo neto anual de la red M2M-IoT Satelital.	121
4.15. Resumen de flujo de cada anualizado.	121



Índice de figuras

1.1. Pueblo de Yungay sepultado por una avalancha glaciaria en 1970	2
1.2. Se observa el enorme desplazamiento del aluvión desde la laguna de Palcacocha hasta la ciudad de Huaraz (Foto Arnold Heim, 24. VI. 1947). Imagen tomada de la <i>Nota Técnica lo que el Agua se Llevó</i> [Wegner, 2014].	3
1.3. Desarrollo del lago A162 (-72.78W, -13.20S, 4573 m snm., Cordillera Vilcabamba) en el período 2006-2017. Imágenes: CNES Airbus / Digital Globe (Google Earth), tomada de [Drenkhan et al., 2019].	4
1.4. Estaciones Base Celular. Gráfico: Checa tu señal OSIPTEL, información actualizada al 17/07/2023.	6
1.5. Obras civiles implementadas en la laguna Palcacocha. Fuente: Registro fotográfico del Ing. Cesar Portocarrero y de la Unidad de Glaciología. .	9
1.6. Se establecieron estaciones de comunicación por microondas y puntos de monitoreo a lo largo de la cordillera Blanca. Estas estaciones incluyen la estación de recepción en la Municipalidad de Carhuaz (1), la estación repetidora (2), la estación de monitoreo hidrometeorológico ubicada en la Pampa Shonquil (4) y la estación de monitoreo en la Laguna 513 (3). Las fotografías y los mapas utilizados en este estudio han sido adaptados de la publicación de [Frey et al., 2014].	11
1.7. En el estudio realizado por Alvarado-Lugo en 2018, se presenta la disposición de la red de microondas. Los saltos de repetición entre las estaciones base se representan en color verde, mientras que la distancia lineal desde el nodo de la laguna Palcacocha hasta el punto de recepción en la ciudad de Huaraz se muestra en color amarillo. Fuente: Adaptación del trabajo de [Alvarado-Lugo, 2018]	12
1.8. Distribución de los enlaces punto a punto de la red de microondas (marcadores amarillos). La red de datos en UHF se expande en la zona de medición de los parámetros ambientales muy cerca de las lagunas (marcadores naranjas). Fuente: Adaptación del estudio de inversión pública “Creación del servicio de alerta temprana frente al riesgo de aluvión de la sub cuenca de Quillcay – SAT Palcacocha, Cuchillacocha y Tullpacocha”	13
1.9. Red de geosensores implementados en asentamiento de Bello Oriente, Medellín. Los puntos rojos representan los nodos donde se detectó movimiento de tierras mientras que los puntos verdes no. Fuente: [Thuro et al., 2020]	15
1.10. Implementación de un sistema de comunicación a base de Wi-Fi en los Himalayas, Nepal. Fuente: Adaptación fotográfica del estudio de Gurung (2010).	16

1.11. Proceso de medición del nivel de agua en la laguna Shako Cho, en los Himalayas. En la imagen se aprecia la utilización de una antena de comunicación satelital de grandes dimensiones. Esta elección se fundamenta en la frecuencia de operación del satélite, que se encuentra en la Banda C, y en la considerable distancia a la que se encuentran los satélites, aproximadamente a 35,000 km de altura. Fuente: Kumar (2020).	17
2.1. Clasificación de tecnologías inalámbricas clasificadas de acuerdo al Potencial de Impacto en la Sociedad (Vertical) y Potencial de Innovación en Productos y Servicios (Horizontal). En rojo se marcan las tecnologías que se analizan en el presente estudio. Fuente: Gartner (2019).	19
2.2. Posicionamiento de la tecnología LPWAN. Se muestra una comparativa entre la velocidad de datos (data rate) y el rango de operación (range). Fuente: tomado de [Mekki et al., 2019].	21
2.3. (a) Topología en estrella, (b) Topología de red en malla. Fuente: Elaboración propia.	22
2.4. Entidades típicas de las redes de área amplia y de baja potencia (LPWAN). Fuente: Elaboración propia basado en [Jamali-Rad et al., 2018].	23
2.5. Arquitectura híbrida LPWAN. Fuente: Elaboración propia.	24
2.6. Arquitectura mixta LPWAN. Fuente: Tomado del estudio propuesto por Rubio y Aparicio publicado en [Rubio-Aparicio et al., 2019].	25
2.7. Diagrama de la solución empleando la tecnología LoraWan. Fuente: Elaboración propia	32
2.8. Diagrama de la solución empleando la tecnología SigFox. El modelo de negocio se basa en la venta de conectividad IoT, de esta forma controlan la infraestructura desde los puntos finales hasta el gateway de la estación base. Fuente: Elaboración propia	34
2.9. Diagrama de la solución empleando la tecnología NB-IoT. Se observa la estrecha relación con los componentes que conforman una red móvil LTE. Fuente: Elaboración propia	35
2.10. Canalización WiFi para las bandas 2.4 GHz, 5GHz y 6GHz. Fuente: Broadcom 2022 (https://docs.broadcom.com/doc/wi-fi-6e-frequency-bands).	40
2.11. Ejemplos de interferencia de canal adyacente y cocanal de la banda 2.4 GHz. Fuente. Adaptación de Ekahau (2022) (https://www.ekahau.com/blog/channel-planning-best-practices-for-better-wi-fi/)	41
2.12. Radio Senao 2511CD Plus Ext2 utilizado en el estudio de Chebrolu (2006), que posibilitó un alcance punto a punto de hasta 39 km con velocidades de transferencia de 1-5 Mbps. Por otro lado, el Radio Rocket Prism 5AC, según el informe de Alvarado-Lugo (2018), logró velocidades de aproximadamente 190 Mbps.	42
2.13. De acuerdo al reporte de IoT Analytics, se espera que los ingresos que generen los servicios de IoT Satelital para el 2026 se duplique aumentando Tasa de Crecimiento Anual Compuesto (CAGR), superando los mil millones de dólares. Fuente: IoT Analytics (2022)	43
2.14. Ámbito de aplicación de la tecnología M2M. Fuente: Machine-to-machine (M2M), TechTarget, Shea (2019).	44
2.15. Tipos de satélites clasificados de acuerdo a la orbita de operación. Fuente: Análisis de la base de datos: Union of Concerned Scientists USA.	45

3.1. Mapa de área de estudio. En rojo se muestra la delimitación de la subcuenca Santa Cruz. Fuente: Elaboración propia.	51
3.2. Análisis de pendientes de la zona estudiada, en verde se muestran las zonas con pendientes en el rango de 0° a 20°, en naranja de 20° a 40°, y en rojo de 40° a 60°. Fuente: Elaboración propia empleando el software Google Earth Engine.	52
3.3. Índices de vegetación en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	53
3.4. Representación visual del funcionamiento de los sensores de nivel de agua de tipos radar y presión. Fuente: Elaboración propia.	54
3.5. Ubicación preferente de un sensor de cuerda vibrante sobre el frente glaciar. Fuente: Adaptación de la figura de [Quintero Londoño, 2020].	56
3.6. Estación meteorológica de alta montaña. Marca Campbell Scientific.	58
3.7. Estructura de mensajes utilizada para los sensores.	59
3.8. El punto de medición del nivel de espejo de agua en el punto A es el mismo que en el punto B debido a las propiedades hidrostáticas del agua y principalmente a la distribución homogénea del líquido sobre un plano horizontal.	63
3.9. Los puntos A y B se encuentran ubicados en la zona media y frontal de la laguna, asimismo se encuentran alejados de la zona de deslizamiento de masas. Los puntos A' y B' son puntos de redundancia de A y B.	63
3.10. Los puntos A y B representan la ubicación del sensor de cuerda vibrante, los cuales se encuentran próximas a la zona de deslizamiento de masas.	64
3.11. En el punto A representa la estación meteorológica, la cual se encuentra alejada de la laguna y a un nivel altitudinal cercano a la laguna y el glaciar.	65
3.12. Ubicación de los sensores ambientales. Sensor de Nivel de Espejo de Agua (SNEA), Sensor de Deslizamiento de Masas (SDM) y los Sensores Meteorológicos (SM).	66
3.13. Topología de la red WIFI-LPWAN, dicha red se compone de dos segmentos principales: El primero es la red Wifi y el segundo es la red LPWAN. La red Wifi cumple la función de la red de transporte mientras que la red LPWAN cumple las funciones de la red de acceso.	67
3.14. Ubicación del Gateway LPWAN (GW_LPWAN). El gateway se ubica cerca de los Sensores Meteorológicos (SM).	68
3.15. Análisis de línea de vista del Gateway LPWAN hacia los sensores ambientales (SDM, SNEA, SM). Radio de cálculo 3 km.	70
3.16. Estimaciones de potencia recibida en el Gateway LPWAN aplicando el modelo Okumura-Hata. En el eje Y se muestra la potencia recibida por el Gateway LPWAN. En el eje X superior e inferior, se muestran los sensores ordenados de menor a mayor con respecto a la distancia que los separa del gateway.	72
3.17. Cambios en la potencia recibida en el gateway LPWAN y el sensor SNEA4.	73
3.18. Correlación entre los factores de las simulaciones y la señal recibida en el Gateway LPWAN bajo el modelo Okumura-Hata.	74
3.19. Estimación de potencia recibida en el Gateway LPWAN aplicando el modelo Cost231-Hata y comparación con los resultados del modelo Okumura-Hata. Las líneas continuas corresponden a Cost231-Hata y las líneas discontinuas corresponden al modelo Okumura-Hata. Las simulaciones realizadas bajo los mismos parámetros presentan el mismo color.	75

3.20. Correlación entre los factores de las simulaciones y la señal recibida en el Gateway LPWAN bajo el modelo Cost231-Hata.	76
3.21. Estimaciones de potencia recibida en el Gateway LPWAN aplicando el modelo ITU-R P1546. En el eje Y se muestra la potencia recibida por el Gateway LPWAN. En el eje X superior e inferior, se muestran los sensores ordenados de menor a mayor con respecto a la distancia que los separa del gateway.	78
3.22. Variación de la potencia de ruido térmico en función de la temperatura para un ancho de banda de 125 kHz aplicando el modelo de Johnson-Nyquist.	79
3.23. Estimación de las potencias recibidas en el Gateway LPWAN y su relación con el Ruido de Fondo. La línea negra representa el valor promedio de Ruido de Fondo.	80
3.24. Capacidades promedio por tecnología ara los sensores	86
3.25. Diagrama de conexión Punto a Punto (PtP) establecido para el segmento WIFI. La base, que tiene acceso a internet, se sitúa en un punto estratégico de la Municipalidad de Cashapampa. A través de esta red PtP, la conexión se extiende hasta la ubicación remota del Gateway LPWAN.	87
3.26. Perfil de conexión, del primer trampo de la red de transporte, entre la Base y el nodo repetidor 1 (Rep1).	88
3.27. Perfil de conexión, del segundo trampo de la red de transporte, entre la repetidor 1 y 2 (Rep1 y Rep2).	89
3.28. Perfil de conexión, del tercer trampo de la red de transporte, entre la repetidor 2 y 3 (Rep2 y Rep3).	89
3.29. Perfil de conexión, del trampo final de la red de transporte, entre la repetidor 3 y el nodo final (Rep3 y Final).	90
3.30. Conexión física entre el nodo final de la red WIFI y el gateway LPWAN.	90
3.31. Topología básica de la red satelital M2M-IoT.	91
3.32. Cobertura satelital del servicio IsatDataPro. Los satélites que cubren la zona de estudio son I-3 F5 y I-4 F3. Fuente: Inmarsat Coverage IsatDat Pro.	92
3.33. Cobertura satelital de Inmarsat I-4 F3 sobre la posición geográfica del Perú. Fuente: satbeams.com	94
3.34. Estimación de línea vista de los terminales satelitales ubicados en la posición de los sensores ambientales. Ambas imagenes muestran la zona de estudio desde diferentes angulos. Las lineas verdes describen el enlace de cada sensor con el satelite Inmarsat I-4 F3.	94
3.35. Variación de la relación señal ruido (SNR) en la ecuación SNR, donde L_o representa las perdidas por atenuación atmosférica que varían de 0 a 10 dB. La línea azul representa cómo cambia el SNR a medida que aumenta la atenuación atmosférica.	101
3.36. Variación de velocidad de transmisión satelital (capacidad de canal) en función de un SNR variable.	102
3.37. Modelo conceptual de conexiones del sensor de nivel de agua (SNEA). a) Diseño utilizando el transmisor M2M-IoT Satelital. b) Diseño utilizando el transmisor y Gateway LPWAN.	105

4.1. Estimación del valor estadístico de la vida humana en el Perú. Fuente:
Cuadro resumen del estudio de [Seminario-de Marzi, 2017]. 118



Capítulo 1

Introducción

1.1. Establecimiento del Problema

1.1.1. Efectos del cambio climático en el Perú

El cambio climático es un problema que lleva mucho tiempo entre nosotros; numerosas investigaciones demuestran su efecto negativo sobre el ambiente durante los últimos 100 años. Según el último reporte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), las emisiones de carbono y otros aerosoles producidos por la industria y las actividades antrópicas elevan considerablemente el nivel de la temperatura superficial de la Tierra y los océanos [Masson-Delmotte et al., 2018]. En el Perú, los efectos del calentamiento global se manifiestan de diferentes formas y en diversos lugares, como es el caso de las lluvias extremas en la zona norte y las sequías en la zona sur, a consecuencia del Fenómeno del Niño [Cai et al., 2014] [Carréric et al., 2020].

A pesar de los compromisos asumidos por los países participantes en la COP25, donde se busca evitar que la temperatura promedio del planeta se incremente en 1.5 °C este siglo, los esfuerzos resultan insuficientes debido a la poca participación de países líderes como Estados Unidos, China e India, catalogados como grandes emisores de gases de efecto invernadero. Además, dichos países no muestran intenciones de contrarrestar el incremento de la temperatura [UNFCCC, 2019]. Otra consecuencia negativa del cambio climático se manifiesta en la zona andina del Perú, específicamente en los glaciares, los cuales son la reserva más importante de agua del país. Los glaciares están experimentando un proceso acelerado de derretimiento; por ejemplo, la cordillera Huaytapallana, ubicada en la región central del Perú, ha perdido su área glaciaria en un 55 % durante los últimos 28 años [López-Moreno et al., 2014]. Se concluye que dicha pérdida se debe principalmente al aumento de la temperatura superficial de la Tierra y al carbono negro, que tiene la particularidad de depositarse sobre las superficies glaciares, contribuyendo a su calentamiento y acelerando su desaparición [Torres et al., 2018], [Schmitt et al., 2015]. Por otro lado, la Amazonía peruana también atraviesa cambios por efecto del cambio climático. Un estudio de prospectiva elaborado por Oxford prevé que el cambio en la temperatura y las precipitaciones alterará la producción de alimentos y la estabilidad hídrica en el planeta [Pajares, 2014].

1.1.2. Riesgos de las Montañas Andinas

Los Andes, la cadena montañosa más grande del continente, albergan la mayor cantidad de glaciares tropicales del planeta, y aproximadamente el 70 % de estos se encuentran en territorio peruano [Vuille et al., 2008]. Sin embargo, debido al calentamiento global, los glaciares están experimentando una serie de cambios climáticos que afectan negativamente los ecosistemas de montaña y el desarrollo de las poblaciones que dependen de ellos. Diversos estudios abordan la problemática relacionada con la desaparición de los glaciares y la formación de nuevas lagunas al pie de las montañas. Según Haeberli y Linsbauer, las proyecciones para los Alpes durante la segunda mitad del siglo XXI indican que numerosos lagos nuevos se están formando debido al incremento de la temperatura. Además, es probable que ocurran escenarios similares en otras regiones montañosas frías del mundo [Haeberli and Linsbauer, 2013]. Esta predicción se ajusta a la realidad peruana, donde existen 18 cordilleras glaciares a lo largo del territorio nacional [INAIGEM, 2018].

Los glaciares peruanos se caracterizan por su diversidad paisajística, el atractivo turístico de sus nevados y, principalmente, los recursos naturales que ofrecen a la población. Sin embargo, el incremento de la temperatura y los cambios estacionales en el clima impactan de forma negativa en los glaciares. Entre los efectos más importantes se encuentra la formación de peligros naturales, como avalanchas y aluviones, que amenazan el desarrollo de las poblaciones situadas en las zonas cercanas a los glaciares. En el Perú, ya se han registrado este tipo de desastres naturales, siendo uno de los más representativos la avalancha del Nevado Huascarán (6,757 m.s.n.m.) [INAIGEM, 2017]. En 1970, esta avalancha sepultó los pueblos de Yungay y Ranrahirca, cuyos habitantes quedaron atrapados bajo escombros de hielo y rocas [Plafker and Ericksen, 1978].

En la Figura 1.1, se observa el pueblo de Yungay antes (A) y después (B) del 31 de mayo de 1970. A: el área urbana de Yungay está delineada por una línea blanca (fotografía del Servicio Aerofotográfico Nacional de Perú, 9 de enero de 1962). B: el área urbana de Yungay superpuesta a los escombros del lóbulo de Yungay depositados el 31 de mayo de 1970 (fotografía aérea de la NASA, 14 de julio de 1970) [Evans, 2010].

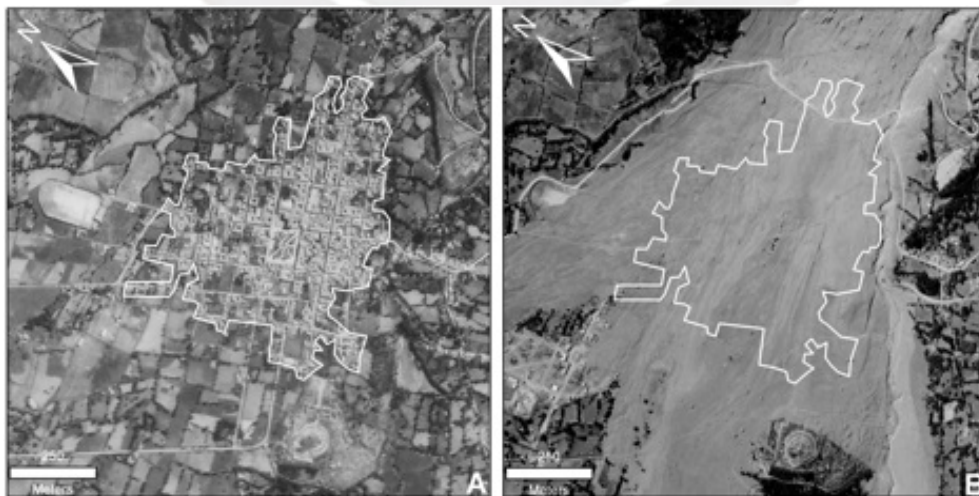


Figura 1.1: Pueblo de Yungay sepultado por una avalancha glaciaria en 1970

La avalancha de Yungay es un ejemplo claro de la variedad de peligros que se encuentran presentes en ambientes aparentemente apacibles, armónicos y turísticos como los Andes peruanos. Otro antecedente negativo ocurrió en la ciudad de Huaraz, Áncash, en 1941, cuando la laguna Palcacocha, formada al pie de un glaciar, se desbordó. Este hecho desencadenó un flujo de rocas que se desplazó a lo largo de la quebrada Cojup, alcanzando la población en cuestión de minutos. Como resultado, se produjeron pérdidas de vidas humanas y daños económicos en la industria local; se calcula que alrededor de 5,000 personas perdieron la vida [Wegner, 2014].



Figura 1.2: Se observa el enorme desplazamiento del aluvión desde la laguna de Palcacocha hasta la ciudad de Huaraz (Foto Arnold Heim, 24. VI. 1947). Imagen tomada de la *Nota Técnica lo que el Agua se Llevó* [Wegner, 2014].

Eventos similares siguen ocurriendo en la actualidad. En 2012, una avalancha de proporciones similares sacudió la laguna 513, ubicada en la parte alta del distrito de Carhuaz. Según estudios y estimaciones, el volumen de hielo depositado sobre la laguna provocó una ola de 20 metros; sin embargo, afortunadamente, no fue suficiente para causar un desembalse de la laguna [Vilímek et al., 2015]. Un último evento de magnitud similar ocurrió en 2019, durante la temporada seca, en el nevado Salcantay, ubicado en la cordillera Vilcanota. Allí se reportó una avalancha que provocó un aluvión considerable, logrando atravesar la morrena que contenía la laguna y provocando su ruptura. Como resultado, una gran cantidad de rocas y lodo se desplazó sobre el río Vilcanota, destruyendo puentes y carreteras vitales para el desarrollo económico. Además, en este evento se registró la pérdida de vidas humanas. Como se puede evidenciar, el riesgo glaciar es un problema vigente.

1.1.3. El Peligro de las Lagunas Andinas

Los efectos del cambio climático en la región andina del Perú se evidencian en la rápida desaparición de los glaciares. Aunque existen múltiples factores que intervienen en este proceso, el retroceso de los glaciares se debe principalmente al incremento de la temperatura en las regiones montañosas. Como consecuencia, y a medida que los glaciares desaparecen, se originan nuevas lagunas [Vuille et al., 2018]. Hay evidencia de que este fenómeno ocurre desde la última Pequeña Edad de Hielo [Fagan, 2000]. Los peligros surgen del hielo excesivamente empinado, las rocas y morrenas inestables, la degradación del permafrost y las pendientes sin contrafuertes. En este contexto de condiciones cada vez más peligrosas, la separación de hielo y las masas de rocas podría tener una mayor probabilidad de llegar a los lagos glaciares que se forman al pie de los glaciares, inducir olas de impacto y desencadenar el colapso e inundación de una laguna glaciar (en inglés, Glacial Lake Outburst Flood, GLOF), afectando a las personas y activos ubicados más abajo en áreas a menudo caracterizadas por la expansión urbana [Colonia et al., 2017] [Haeberli et al., 2017].

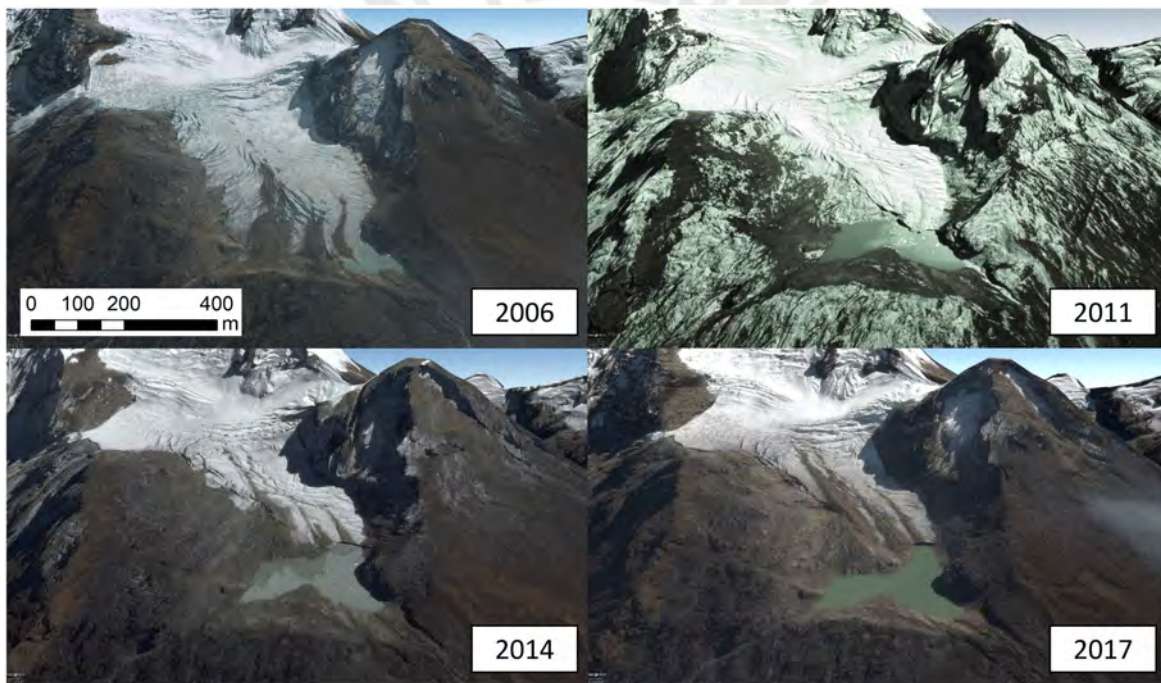


Figura 1.3: Desarrollo del lago A162 (-72.78W, -13.20S, 4573 m snm., Cordillera Vilcabamba) en el período 2006-2017. Imágenes: CNES Airbus / Digital Globe (Google Earth), tomada de [Drenkhan et al., 2019].

El incremento de los peligros naturales, sumado a la desinformación o desconocimiento del daño que pueden ocasionar, también incrementan la vulnerabilidad de las poblaciones. La escasez de proyectos públicos y/o privados que intenten resolver este problema, esto se debe principalmente a la desconexión que ha existido por décadas entre los científicos, la sociedad y los políticos [Carey, 2005].

1.1.4. Brecha de Telecomunicaciones

El alcance de las telecomunicaciones en la investigación del cambio climático es evidente en múltiples escenarios, desde las imágenes satelitales utilizadas para predecir las condiciones meteorológicas hasta los datos ambientales registrados y transmitidos constantemente por sensores. Hoy en día, es casi imposible encontrar una actividad humana que no dependa, directa o indirectamente, de los servicios y capacidades que ofrecen las telecomunicaciones. El monitoreo de glaciares y lagunas también se beneficia de estas tecnologías, ya que ahora es técnicamente posible registrar de forma continua la actividad de un glaciar o laguna, y detectar y alertar sobre eventos peligrosos que puedan ocurrir.

Antes de la llegada de las tecnologías de comunicación, las personas establecían campamentos o puestos de vigilancia muy cerca de la laguna o glaciar peligroso. Esto les permitía monitorear el comportamiento del peligro y dar aviso en caso de la ocurrencia de un desastre. La forma más eficiente de transmitir el mensaje era a través de caballos o mediante rutas secretas a través de las montañas escarpadas. Esta forma de vigilancia cambió con la llegada de la radio, que permitía transmisiones de larga distancia a través de ondas cortas (HF). Posteriormente, se implementaron sistemas SCADA, inicialmente usados en la industria minera y luego adaptados para el monitoreo ambiental. Más recientemente, se han aplicado tecnologías satelitales de banda ancha y redes WiFi de larga distancia con configuraciones punto a punto (PtP) y punto a multipunto (PtMP). Esta última tecnología, en combinación con sensores compatibles con sistemas inalámbricos, se está utilizando en proyectos de inversión pública orientados zonas de alta montaña [ORGRDS, 2023].

La aplicación de las redes WiFi de larga distancia responde a la inexistencia de medios de comunicaciones en ambientes remotos de montaña. Como se observa en la siguiente Figura 1.4, los círculos de colores representan estaciones base celulares capaces de proporcionar conectividad. Sin embargo, su ubicación dista considerablemente de las zonas donde se originan los peligros como avalanchas y aluviones. Por ello, las redes WiFi PtP permiten expandir conectividad hasta el lugar deseado, siempre y cuando las condiciones geográficas del lugar lo permitan.

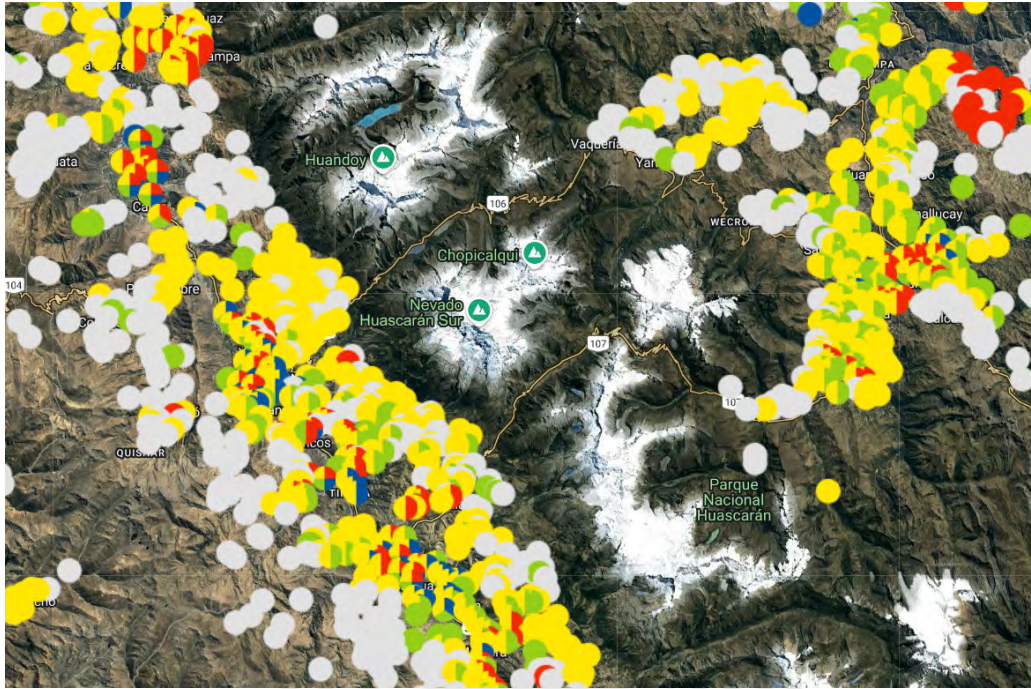


Figura 1.4: Estaciones Base Celular. Gráfico: Checa tu señal OSIPTEL, información actualizada al 17/07/2023.

Para el año 2025, se estima que Perú necesitará 60,771 estaciones base celulares (antenas) para soportar el creciente tráfico de Internet móvil e inalámbrico, según un estudio de [OSIPTEL, 2021]. En 2019, había 24,076 estaciones instaladas, por lo que las empresas deberán desplegar 36,695 nuevas estaciones para alcanzar este objetivo. Sin embargo, debido a la naturaleza comercial de los operadores móviles, es poco probable que se implementen redes de comunicación en zonas de alta montaña donde la demanda de conectividad no es masiva. Esto mantiene latente la necesidad de medios de comunicación a medida para aplicaciones como el monitoreo de glaciares y lagunas peligrosas. Además, abre la posibilidad de evaluar diferentes tecnologías de comunicación emergentes y las combinaciones posibles entre redes híbridas como WIFI-LPWAN o tecnologías satelitales.

1.2. Problema de Investigación

¿Existe una diferencia significativa en el rendimiento de red en términos de la velocidad de transmisión de datos, así como en la inversión económica en términos de costos de implementación y costos de mantenimiento, entre una red de comunicación inalámbrica que combina WiFi-LPWAN y una red satelital comercial M2M-IoT?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Comparar el rendimiento de la red en términos de la velocidad de transmisión de datos, así como la inversión económica en términos de costos de implementación, costos de operación y costos de mantenimiento, entre dos redes de comunicación inalámbricas. La primera red es una combinación de redes WiFi y LPWAN, diseñadas para el transporte y acceso de datos, respectivamente. La segunda es una red satelital comercial M2M-IoT. Ambas redes se evaluarán en un contexto estimado de tráfico de red generado por sensores ambientales.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Revisar la literatura existente sobre la aplicación de las tecnologías WiFi-LPWAN y M2M-IoT Satelital en el contexto de monitoreo de variables ambientales en entornos de alta montaña.
2. Evaluar y comparar la velocidad de transmisión de datos de la red WiFi-LPWAN y la red M2M-IoT satelital en un entorno simulado de la laguna Arhuaycocha, cordillera Blanca.
3. Describir y comparar la cobertura de la red WiFi-LPWAN y la red satelital M2M-IoT en el área geográfica de la laguna Arhuaycocha, cordillera Blanca.
4. Analizar los costos de implementación, operaciones y mantenimiento de la red WiFi-LPWAN y el servicio satelital M2M-IoT y comparar su viabilidad económica.
5. Interpretar y discutir los resultados obtenidos para identificar las ventajas y desventajas de cada opción de red inalámbrica en términos de cobertura y costo.

1.4. Justificación

1.4.1. Conveniencia

La investigación ofrece la posibilidad de evaluar técnica y económicamente el despliegue de una solución tecnológica para el monitoreo de peligros que se originan en las montañas andinas del Perú. En especial, se analiza el caso de la laguna Arhuaycocha, ubicada en la región de Ancash, dicha laguna presenta un peligro natural para los centros poblados y comunicados que habitan esta zona.

1.4.2. Relevancia Social

Esta investigación podría ser una fuente de información para el desarrollo de proyectos e iniciativas orientadas a la prevención de desastres, los cuales en su mayoría son desarrolladas por comunidades locales, entidades públicas, empresas privadas y organizaciones no gubernamentales (ONG).

1.4.3. Implicaciones practicas

El desembalse de una laguna peligrosa (aluvión) generaría un flujo masivo de agua, rocas y lodo, capaz de arrasar todo a su paso hasta llegar a los centros poblados y comunidades locales. Esto provocaría principalmente la pérdida de vidas humanas, daños económicos y afectación significativa a la infraestructura. El principal problema radica en la incertidumbre sobre cuándo ocurrirá este desembalse. Diversos factores pueden desencadenar el evento, tales como avalanchas provenientes de glaciares cercanos, sismos de gran magnitud y el deterioro de la estructura frontal del dique que contiene la laguna, entre otros.

Diseñar un sistema de comunicación que permita la recopilación automática de datos facilitaría una evaluación constante del nivel de peligrosidad de una laguna, lo que, a su vez, reduciría la vulnerabilidad de la población. Para este fin, es fundamental conocer las características técnicas del sistema de comunicación. Uno de los parámetros clave analizados en este estudio es la velocidad de transmisión de datos, que determina el tiempo y el volumen de información que el sistema puede manejar. En la vigilancia de lagunas, se pueden generar diversos tipos de datos. Transmitir el conjunto adecuado de información en el menor tiempo posible optimizaría la respuesta de la población ante un desastre.

Otro parámetro importante del sistema de comunicaciones es la cobertura de red, que permite establecer las distancias máximas a las que se puede ubicar un sensor en relación con su estación base. Además, es un indicador de la calidad de la comunicación entre la estación base y los sensores. Adicionalmente, es importante evaluar la inversión económica necesaria para la implementación del sistema de comunicación y los sensores, ya que existen diversas tecnologías que permiten la transmisión de datos desde lugares remotos. No obstante, identificar la solución óptima en términos económicos facilitaría la viabilidad de futuros proyectos en poblaciones altoandinas con bajos recursos.

Estos tres factores se analizan y comparan entre una red híbrida WiFi-LPWAN y la red M2M-IoT satelital, las cuales se proponen como alternativas para la vigilancia de lagunas y glaciares peligrosos en zonas de alta montaña.

1.4.4. Valor teórico

La investigación evalúa el desarrollo de tecnologías emergentes como las comunicaciones LPWAN y M2M IoT. Considerando sus ventajas, desventajas y aplicaciones prácticas. Se desarrolla un análisis sistemático de la literatura empleando bases de datos científicas y revistas indexadas.

1.5. Viabilidad de la Investigación

El estudio se aborda desde una perspectiva teórica, considerando los gastos que conlleva una implementación real de las redes de comunicaciones estudiadas. Así también, no se desarrollan pruebas experimentales de campo debido a las implicancias logísticas que conlleva trasladarse a las ubicaciones estudiadas. Para el diseño de las redes y la evaluación de su desempeño, se emplean un conjunto de simulaciones computacionales y cálculos teóricos. Se emplean datos técnicos de los fabricantes de equipos de comunicaciones. El estudio también contempla mapas de elevación digital y cartográfica geoespacial disponible gratuitamente.

1.6. Antecedentes

Las lagunas andinas han sido objeto de estudio desde la década de 1930. Los investigadores han centrado su interés en observar su distribución y estabilidad a lo largo de las cordilleras glaciares situadas en la región sierra del Perú. Tras la tragedia del aluvión en 1941, el gobierno peruano impulsó una política de gestión de riesgos de desastres que se materializó con la construcción de obras civiles a lo largo de las lagunas peligrosas andinas como medida de prevención frente a un desembalse inesperado [Portocarrero, 2014].

La construcción de obras de seguridad se detuvo en 1996 tras el cierre de la Unidad de Glaciología. Desde entonces, los gobiernos regionales, las municipalidades, las comunidades y las ONG se han encargado del mantenimiento de dichas obras, sin embargo, la creación de nuevos proyectos de seguridad ha sido nulos o escasos. En los últimos años, se ha promovido el desarrollo de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) como medida alternativa de prevención. El objetivo de los SAT es generar un aviso anticipado a la población ante la ocurrencia de algún peligro. En el caso de las lagunas peligrosas, la finalidad de estos sistemas es detectar un cambio anómalo en el comportamiento de la laguna y enviar un aviso por algún medio de comunicación.



Figura 1.5: Obras civiles implementadas en la laguna Palcacocha. Fuente: Registro fotográfico del Ing. Cesar Portocarrero y de la Unidad de Glaciología.

1.6.1. Prevención de desastres naturales en lagunas: Medidas y estrategias

Los Sistemas de Alerta Temprana se pueden definir como un sistema integrado que monitorea, recolecta, analiza e interpreta datos, esta integración de funcionalidades permiten generar información para los tomadores de decisión con el objetivo de proteger la vida y el ambiente. Los avances en la tecnología y las comunicaciones nos proporcionan soluciones innovadoras para la implementación de los SAT, sin embargo, las soluciones de ingeniería, en muchos casos, pueden llegar a ser costosas y en general necesitan de mucho trabajo para conseguir un sistema estable, además la recolección y el monitoreo de datos en tiempo real sigue siendo un desafío en la mayoría de los países [Joseph Quansah et al., 2010].

En el contexto peruano, se considera que un SAT cuenta con cuatro componentes principales: “Conocimiento y vigilancia permanente y en tiempo real de las amenazas”, “Seguimiento y alerta”, “Difusión y comunicación” y “Capacidad de respuesta”. Cada uno de los componentes abarca un conjunto de actividades específicas entorno a la detección, aviso y medidas frente a un riesgo [INDECI, 2015]. Esta investigación se enfoca en analizar el componente de “Seguimiento y alerta”, que está relacionado directamente con las soluciones de ingeniería en el tema de las telecomunicaciones y los sensores ambientales.

En Perú, se han desarrollado varios proyectos para implementar sistemas de alerta temprana. La mayoría de ellos cuenta con el componente de “Seguimiento y Alerta” que, de acuerdo con las disposiciones de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT), agrupa las actividades dedicadas al monitoreo y detección de amenazas. Estas actividades se basan en una base científica y tecnológica y tienen la capacidad de generar y emitir información en un tiempo pertinente para que las autoridades y la población puedan responder rápidamente frente a un peligro repentino.

1.6.2. Sistema de alerta temprana 513

Un caso de implementación de sistemas de alerta temprana tuvo lugar en la laguna 513, ubicada en la región Ancash en la cordillera Blanca. Según una medición del volumen de agua realizada en 2014 por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), se determinó que la laguna contiene un volumen de agua de 15,254,45 litros. Dadas las características geológicas del área, representa un peligro potencial para la población que reside en zonas bajas. Con el objetivo de prevenir riesgos, en el año 2010 se estableció una colaboración entre la ONG CARE Perú, la Universidad de Zúrich y la Municipalidad de Carhuaz, para implementar un sistema de alerta temprana. Este sistema tenía como finalidad monitorear las condiciones de estabilidad de la laguna y detectar los posibles peligros que podrían afectar a la población de Carhuaz y sus caseríos [Huggel et al., 2020].

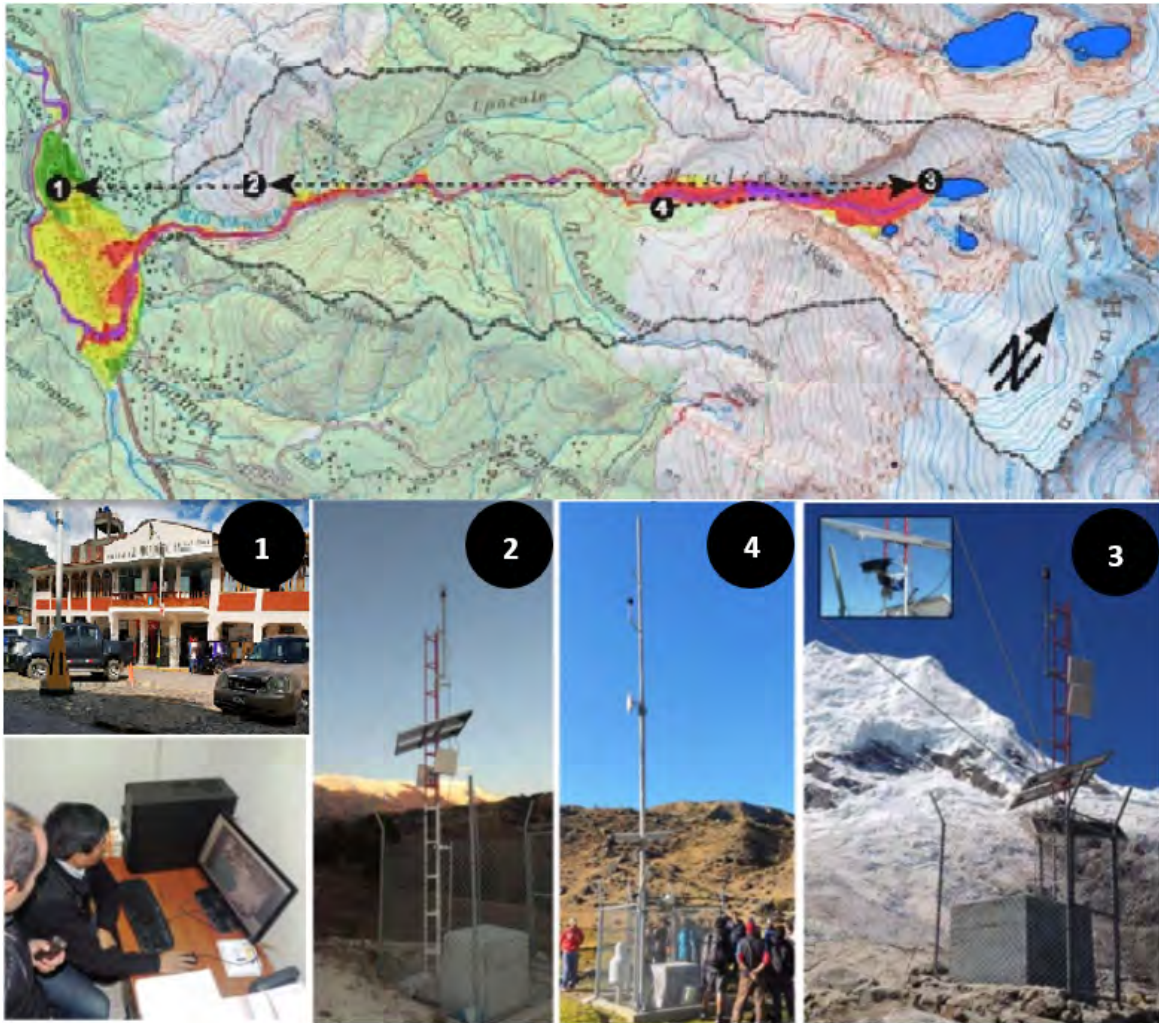


Figura 1.6: Se establecieron estaciones de comunicación por microondas y puntos de monitoreo a lo largo de la cordillera Blanca. Estas estaciones incluyen la estación de recepción en la Municipalidad de Carhuaz (1), la estación repetidora (2), la estación de monitoreo hidrometeorológico ubicada en la Pampa Shonquil (4) y la estación de monitoreo en la Laguna 513 (3). Las fotografías y los mapas utilizados en este estudio han sido adaptados de la publicación de [Frey et al., 2014].

De acuerdo con el informe de Frey (2014), el Sistema de Alerta Temprana (SAT) implementado en la Laguna 513 incluyó el componente de "Seguimiento y Alerta". En este proyecto, se estableció una infraestructura de comunicación inalámbrica basada en la tecnología WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Para la implementación de la red, se emplearon cuatro estaciones base equipadas con transceptores de microondas configurados en enlaces punto a punto. No se encontraron detalles específicos sobre los parámetros y configuraciones de la red en la publicación de [Frey et al., 2014].

El informe describe la frecuencia de envío de datos de dos cámaras, las cuales capturan imágenes instantáneas cada 5 segundos, así como de cuatro geófonos que también transmiten datos cada 5 segundos. La alimentación energética de los equipos de comunicación y sensores se logra a través del uso de baterías y paneles solares.

El sistema entró en operación en el año 2015 y se mantuvo en funcionamiento durante un periodo de tres meses. Lamentablemente, el proyecto se vio interrumpido debido a un incidente de vandalismo por parte de la comunidad local, lo que ocasionó la paralización del sistema. Desde entonces, el sistema no ha sido restaurado y permanece inactivo [AncashNoticias, 2016].

1.6.3. Sistema de Monitoreo de la laguna Palcacocha

En el trabajo realizado por [Alvarado-Lugo, 2018], se diseñó e implementó una red de comunicación utilizando la tecnología WiFi. El objetivo del estudio fue establecer las condiciones necesarias para el transporte de datos desde las montañas hasta la ciudad de Huaraz, separadas por una distancia aproximada de 20 km en línea recta. El tráfico generado en la red proviene principalmente de sensores, como una estación meteorológica y una cámara de videovigilancia. El perfil de conexión revela que la red de transporte emplea conexiones punto a punto entre tres estaciones base equipadas con transeceptores de microondas. Se asignó un ancho de banda de canal de 20 MHz y se utilizó una frecuencia electromagnética de 5.8 GHz.

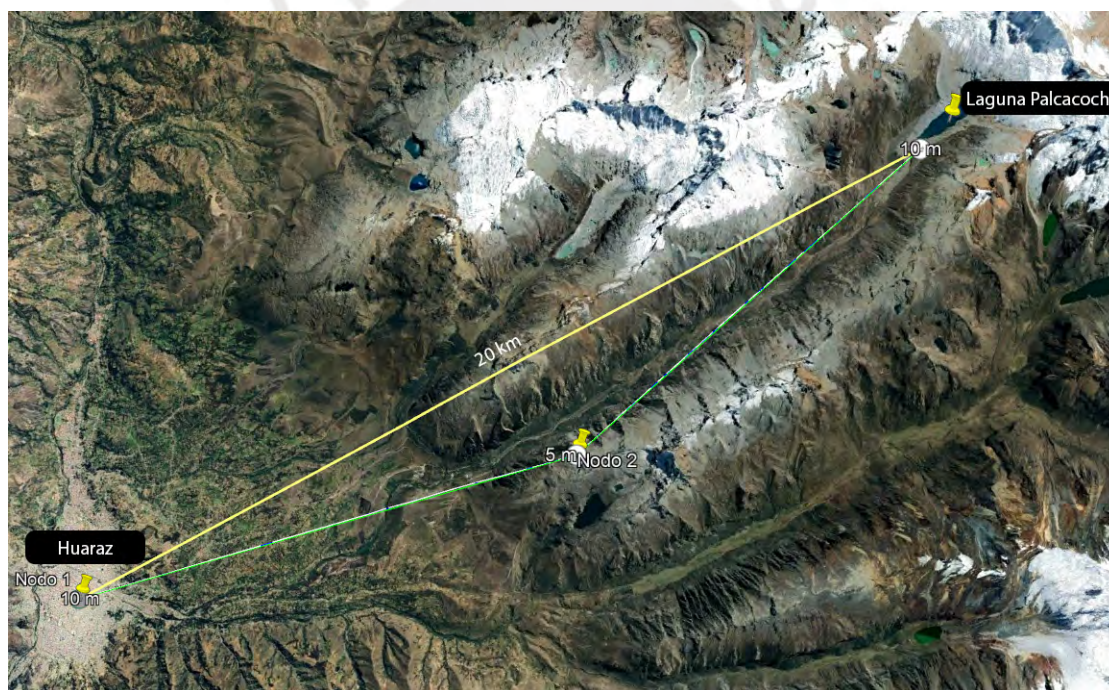


Figura 1.7: En el estudio realizado por Alvarado-Lugo en 2018, se presenta la disposición de la red de microondas. Los saltos de repetición entre las estaciones base se representan en color verde, mientras que la distancia lineal desde el nodo de la laguna Palcacocha hasta el punto de recepción en la ciudad de Huaraz se muestra en color amarillo. Fuente: Adaptación del trabajo de [Alvarado-Lugo, 2018]

En el estudio, no se muestran detalles específicos sobre la inversión económica inicial, los gastos operativos o el mantenimiento de la red implementada. Además, tampoco se proporciona información sobre la metodología utilizada para la selección de la tecnología, así como la elección de las ubicaciones de las estaciones repetidoras.

1.6.4. Sistema de alerta temprana laguna Palcacocha

La laguna Palcacocha es un ejemplo importante del riesgo que representan estos cuerpos de agua para la población. A lo largo de los años, ha sido declarada en estado de emergencia por el estado peruano en 11 ocasiones. En 2014, la Mancomunidad Warac elaboró un proyecto de inversión pública para la implementación del "Sistema de alerta temprana frente a peligros de origen glaciar en el ámbito de las lagunas Palcacocha, Cuchillacocha y Tullparaju". Este proyecto también incluye el monitoreo de las lagunas Cuchillacocha y Tullparaju, también consideradas peligrosas al igual que Palcacocha. No fue hasta 2021, cuando el Gobierno Regional de Ancash informó que el sistema se encontraba al 100 % ejecutado y listo para brindar el servicio de alerta a la población [GORE Ancash, 2021]. El perfil de conexión del componente de "Seguimiento y alerta" muestra que se implementaron dos redes de comunicación de datos. La primera es una red de microondas configurada con enlaces punto a punto en la frecuencia de 5,8 GHz. Esta red se apoya en la tecnología WiMAX, que está configurada como una red de transporte de datos. La segunda es una red de datos en la frecuencia ultra alta (UHF) de 800-2100 MHz. Esta red sirve para la recolección de datos con un volumen pequeño de datos, como aquellos que se generan durante la medición del nivel de agua. Los modelos de equipos empleados en la red son Orange y Adcom A764 para la primera y segunda red, respectivamente.

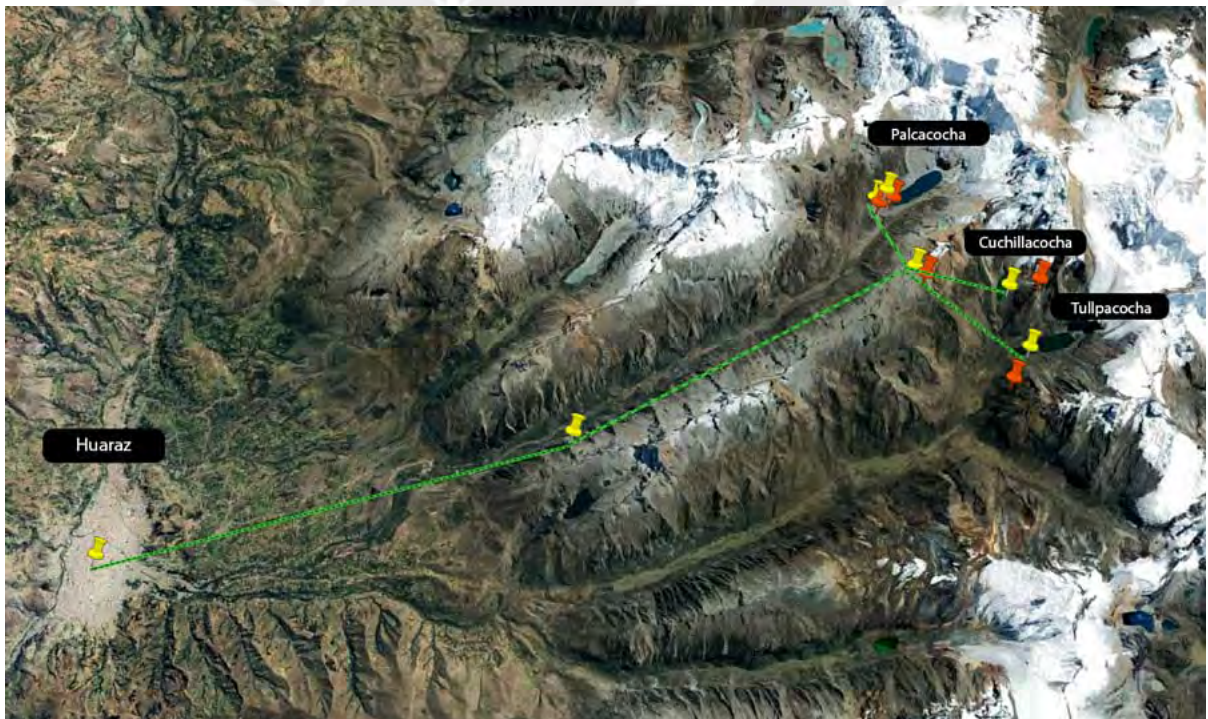


Figura 1.8: Distribución de los enlaces punto a punto de la red de microondas (marcadores amarillos). La red de datos en UHF se expande en la zona de medición de los parámetros ambientales muy cerca de las lagunas (marcadores naranjas). Fuente: Adaptación del estudio de inversión pública “Creación del servicio de alerta temprana frente al riesgo de aluvión de la sub cuenca de Quillcay – SAT Palcacocha, Cuchillacocha y Tullpacocha”

El sistema tiene algunas limitaciones. Una de ellas es la falta de un mecanismo de redundancia en la red de transporte WiMAX y la red UHF. Esto significa que, si hay una falla en una de estas redes, el sistema no podrá funcionar correctamente. Otra limitación es el limitado suministro de energía. El sistema funciona con paneles y baterías solares, pero estos no siempre pueden proporcionar suficiente energía para mantener el sistema en funcionamiento. Esto provoca la pérdida de datos y cortes en la recepción de vídeo.

Los operadores del sistema han informado que estas limitaciones han causado problemas en el monitoreo de las lagunas. Por ejemplo, se han reportado casos donde el sistema no ha detectado cambios en el nivel del agua o en las condiciones atmosféricas. Esto ha llevado a retrasos en la detección de posibles alertas.

1.6.5. Sistema de alerta temprana en los Andes Tropicales

Como parte de experiencias extranjeras y específicamente en las regiones de los Andes Tropicales, se han diseñado e implementando iniciativas de sistemas de alerta temprana, particularmente en Colombia, donde ciudades como Medellín son afectadas por deslizamientos de tierras (Huaycos). Estos proyectos se realizan con el propósito de reducir la vulnerabilidad de la población, la cual se encuentra expuesta a fenómenos naturales adversos. Uno de los temas de investigación ha sido la aplicación de tecnologías emergentes que se adaptan al diseño de los sistemas de alerta temprana de bajo costo [Thuro et al., 2020]. En el trabajo de Thuro se emplearon sensores de bajo costo basados en reflectometría en el dominio del tiempo, sensores de inclinación, extensómetros y piezómetros, con el objetivo de hacer viable el proyecto en países emergentes con limitaciones presupuestarias. Para la comunicación entre los dispositivos, se aplicó la tecnología LPWAN Lora y Arduino, logrando así la integración de una red de geosensores en la que cada nodo cuenta con un registrador de datos basado en Arduino y un transceptor Lora.

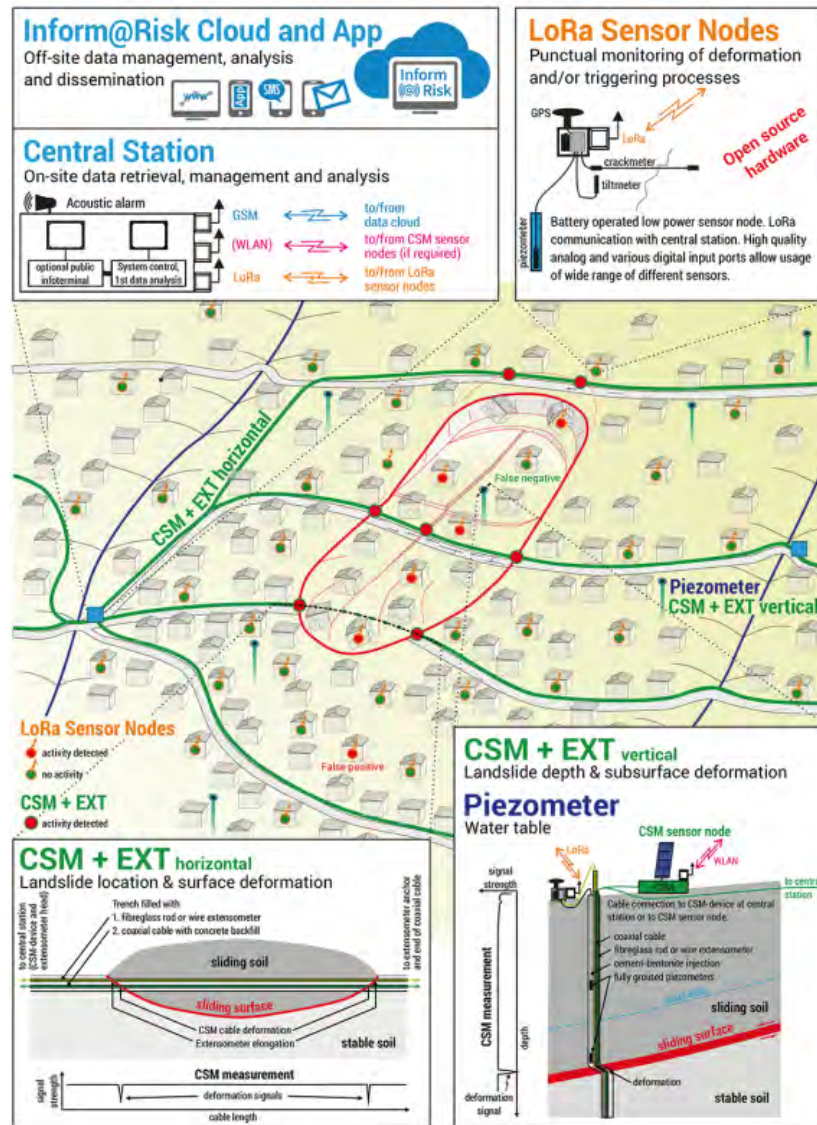


Figura 1.9: Red de geosensores implementados en asentamiento de Bello Oriente, Medellín. Los puntos rojos representan los nodos donde se detectó movimiento de tierras mientras que los puntos verdes no. Fuente: [Thuro et al., 2020]

Según el informe de Thuro (2020), se estima que cada nodo de esta implementación del sistema de alerta temprana tiene un costo de 200 euros, incluyendo baterías solares recargables, paneles solares, registrador de datos y transceptores de comunicación.

1.6.6. Sistema de alerta temprana en los Himalayas, Nepal

En el estudio de [Gurung, D., S. Bajracharya, B. R. Shrestha, 2010] se investigó la implementación de una red de comunicación para el monitoreo de la laguna peligrosa Imja Tsho. La red se basó en la tecnología Wi-Fi y se utilizó para recopilar datos de dos cámaras y un conjunto de sensores atmosféricos (temperatura del aire, humedad, radiación solar, radiación ultravioleta y CO₂). El peso de las imágenes de la cámara estaba entre 0.3 y 8 MB y los datos se enviaban a través de la red cada 10 minutos.

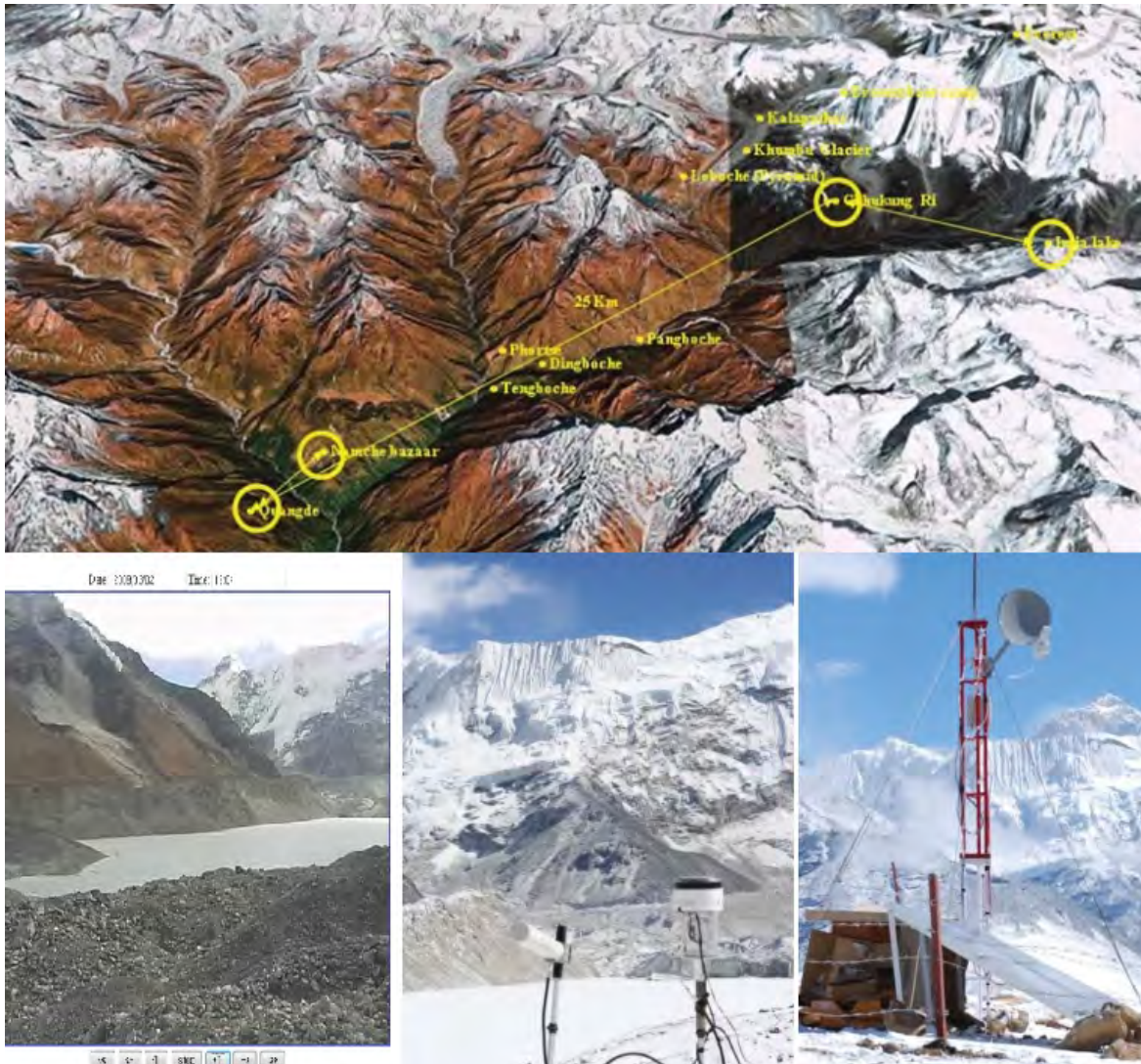


Figura 1.10: Implementación de un sistema de comunicación a base de Wi-Fi en los Himalayas, Nepal. Fuente: Adaptación fotográfica del estudio de Gurung (2010).

La red se componía de cuatro estaciones base conectadas siguiendo el principio de Línea de Vista (LOS). Para el acceso a internet se empleó un proveedor de servicio de Internet (ISP). El estudio no proporcionó detalles sobre el perfil de conexión o los costos de la implementación de la red. Sin embargo, el autor concluyó que la implementación de los sistemas de alerta temprana son un punto importante en la agenda de Nepal, pero que los desafíos financieros siguen siendo un problema en la región.

1.6.7. Sistemas de Alerta Temprana en los Himalayas, India

Los Himalayas, al igual que los Andes, están compuestos por cadenas montañosas. Debido a los efectos del cambio climático, estas áreas también se ven afectadas por el proceso acelerado de derretimiento de los glaciares, lo que resulta en la formación de lagunas peligrosas. El Centro de Desarrollo de Computación Avanzada (C-DAC por sus siglas en inglés) ha desarrollado su primer Sistema de Alerta Temprana aplicado a

inundaciones repentinas de origen glaciario.

El proyecto tiene como objetivo monitorear el comportamiento de 25 lagunas peligrosas en la región de India. Para ello, se han implementado sensores de medición del nivel de agua y comunicación satelital en 2 de ellas, utilizando la red de satélites INSAT-3, que es la constelación satelital de la India.

Según describe [Kumar et al., 2020], los datos de nivel de agua se miden cada 10 minutos en condiciones normales y se envían al satélite INSAT cada 30 minutos. Sin embargo, si se detecta un incremento en el nivel de agua, el sensor comienza a medir cada 2.5 minutos. Los datos se reciben en el Centro de Aplicaciones Espaciales de la India y se obtienen a través del protocolo FTP para su posterior procesamiento.

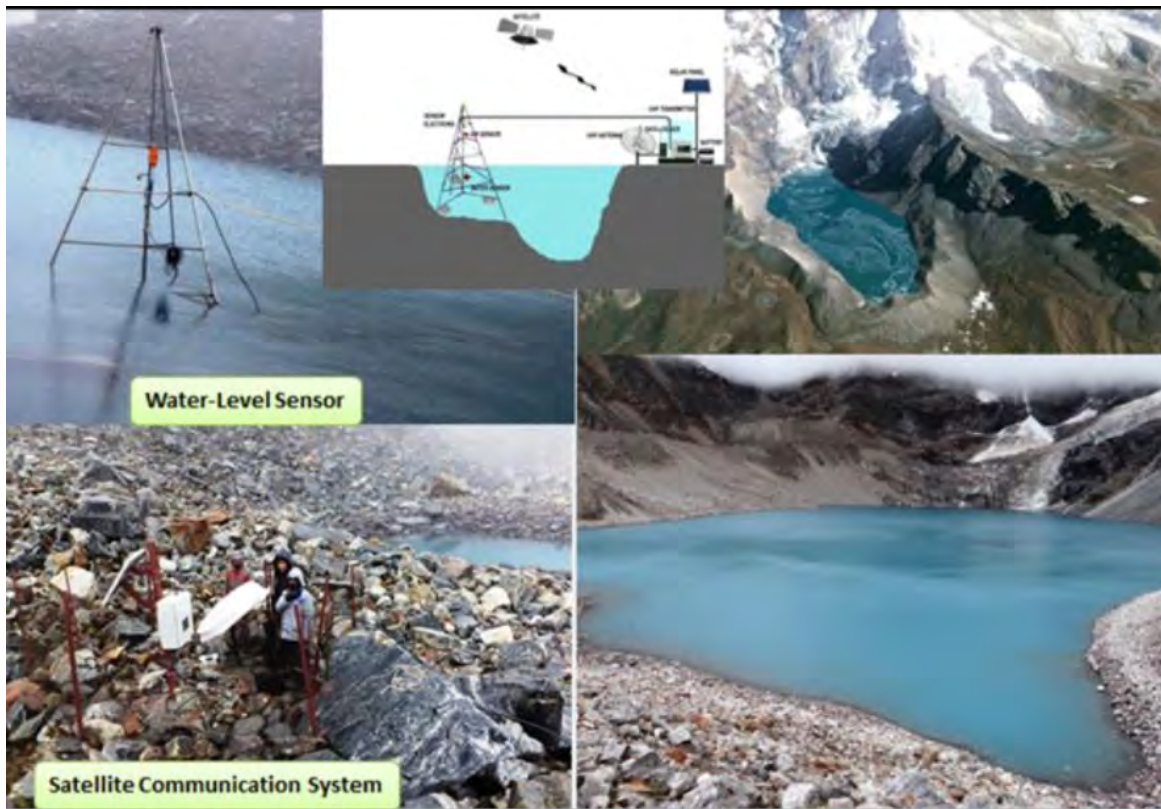


Figura 1.11: Proceso de medición del nivel de agua en la laguna Shako Cho, en los Himalayas. En la imagen se aprecia la utilización de una antena de comunicación satelital de grandes dimensiones. Esta elección se fundamenta en la frecuencia de operación del satélite, que se encuentra en la Banda C, y en la considerable distancia a la que se encuentran los satélites, aproximadamente a 35,000 km de altura. Fuente: Kumar (2020).

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se lleva a cabo una revisión exhaustiva de la literatura sobre el modelo LPWAN y su aplicación en el Internet de las Cosas (IoT). Se abordan la topología y las arquitecturas asociadas, así como las principales tecnologías que implementan este modelo, con un enfoque particular en LoRa, Sigfox y NB-IoT. Además, se analiza la tecnología satelital M2M-IoT, con énfasis en su aplicación satelital. También se examina el panorama actual del mercado de servicios satelitales dedicados al IoT, con especial atención a sus aplicaciones en entornos de alta montaña.

2.1. Tendencia en las Comunicaciones Inalámbricas

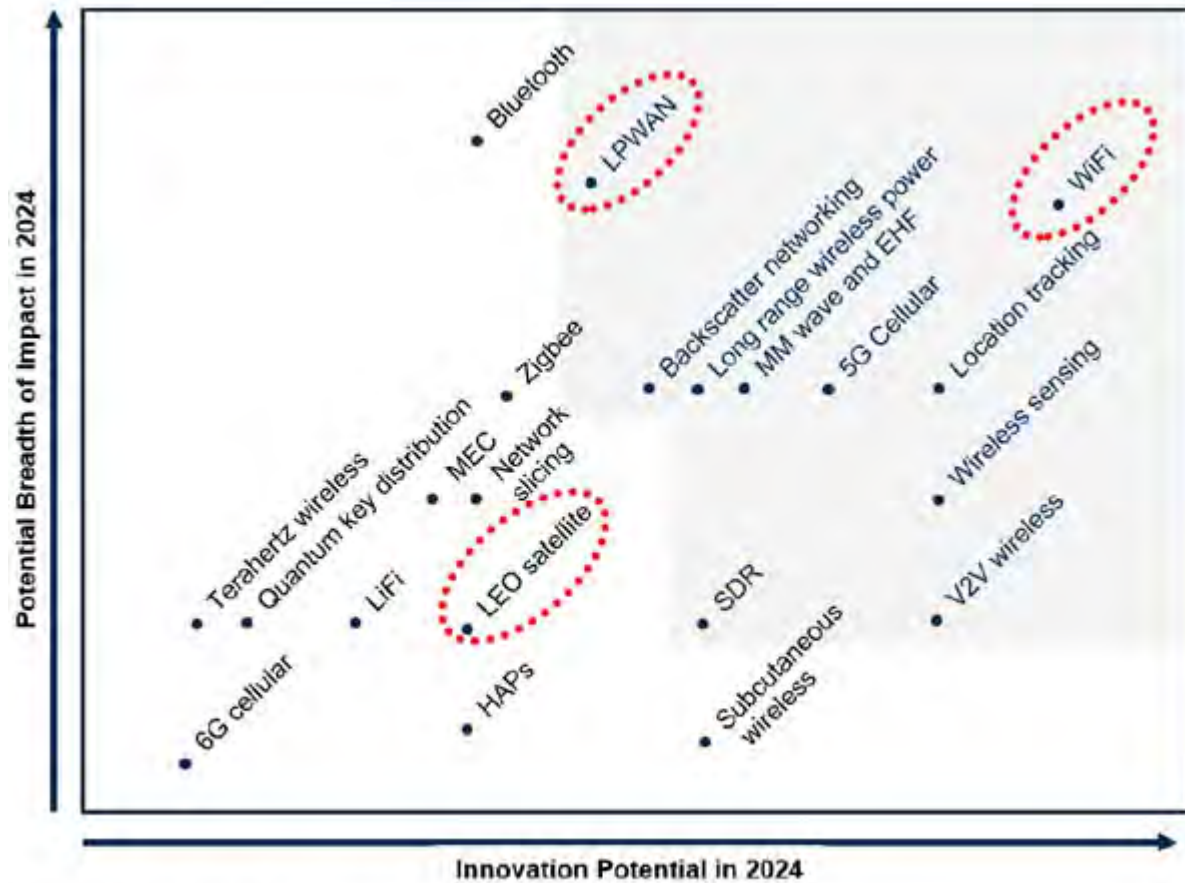
Actualmente, existe una gran variedad de métodos de comunicación inalámbrica que se pueden clasificar según dos factores: el potencial de innovación y el alcance potencial de impacto. El potencial de innovación implica las posibilidades de crear procesos innovadores que habiliten nuevos mercados y productos, mientras que el alcance potencial de impacto se refiere al número de personas o mercados que podrían beneficiarse de ciertas tecnologías [Gartner, 2019]. En la Figura 2.1, se muestra la distribución de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas en función de estos factores.

Notamos que LPWAN (Low Power Wide Area Network) tiene un alto potencial de alcance al público, pero un potencial medio de innovación. Esto se debe al limitado número de empresas tecnológicas existentes en este rubro. Sin embargo, su alto alcance al público se explica por ser una tecnología adecuada para aplicaciones que requieren una baja tasa de transferencia de datos, largo alcance y bajo costo, lo que la hace ideal para diferentes tipos de mercados.

Por otro lado, la tecnología WiFi muestra un alto potencial en relación con ambos factores evaluados. Esto se debe a su presencia en los hogares y la industria, así como a la existencia de numerosas empresas que continuamente innovan en la generación de nuevos productos. Asimismo, las tecnologías satelitales se ubican en la parte media de ambas escalas, lo cual se explica por el limitado número de personas y mercados que tienen acceso a esta tecnología, además del reducido número de empresas que innovan en su desarrollo. Sin embargo, este tipo de tecnología presenta un alto potencial para

la vigilancia de activos en lugares remotos, donde no existen medios tradicionales de comunicación.

En este estudio se realiza una comparación de las tecnologías mencionadas, agrupando las dos primeras (WiFi-LPWAN) y comparándolas con la tecnología M2M-IoT satelital.



Source: Gartner (April 2019)
ID: 384546

Figura 2.1: Clasificación de tecnologías inalámbricas clasificadas de acuerdo al Potencial de Impacto en la Sociedad (Vertical) y Potencial de Innovación en Productos y Servicios (Horizontal). En rojo se marcan las tecnologías que se analizan en el presente estudio. Fuente: Gartner (2019).

2.2. Internet de las Cosas

Existen numerosas definiciones del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés); sin embargo, por convención IoT es una red de dispositivos que se comunican entre sí, independientemente de la interacción humana. Kevin Ashton introdujo el concepto de IoT en 1999. A diferencia de la década de los 2000, cuando la generación de datos e información dependían de las personas mediante la Word Wide Web (WWW), hoy en día contamos con dispositivos que recopilan y envían datos de manera independiente [Ashton et al., 2009].

Los sensores IoT para entornos de montaña y monitoreo ambiental están diseñados para ser resistentes, de bajo consumo energético y autónomos. Entre los más comunes se encuentran los sensores de temperatura y humedad, como los DS18B20 y DHT22, que permiten monitorear microclimas y cambios en la nieve y el hielo. Los sensores de calidad del aire, como los MQ-135, miden la concentración de gases y partículas finas, ayudando a evaluar el impacto ambiental. Los sensores de nieve, utilizando tecnología ultrasónica, miden la acumulación y derretimiento de nieve, el cual se puede aplicar para detectar avalanchas. Sensores de nivel de agua, como los de presión barométrica, evalúan el riesgo de desbordes de lagunas glaciares. Los sensores de radiación solar, como los piranómetros, miden la energía solar incidente, aportando datos para estudios climáticos. Además, sensores de humedad del suelo, como los capacitivos, que son utilizados en la dinámica del agua en ecosistemas de montaña.

Otros sensores incluyen acelerómetros y sensores sísmicos para detectar movimientos de tierra y avalanchas. Los sensores de presión atmosférica, como el BMP280, monitorean condiciones meteorológicas. Cámaras fotográficas, como la Adafruit VC0706, se integran con sensores IoT para monitoreo visual de glaciares y cambios ambientales. Estaciones meteorológicas IoT combinan múltiples sensores, funcionando de manera autónoma con energía solar y transmitiendo datos en tiempo real a través de redes WiFi o LPWAN. Estos sensores brindan una herramienta robusta para monitorear condiciones ambientales extremas y cambios asociados al cambio climático, permitiendo una mejor comprensión y gestión de los ecosistemas de montaña y recursos hídricos. Estos sensores en combinación con registradores de datos y redes de comunicación tienen capacidad de enviar los datos recopilados a diversos destinos sin una interacción explícita de las personas. Todas estas acciones las realiza de manera autónoma y representa la esencia del IoT, donde los datos se recopilan, procesan y transmiten mediante dispositivos electrónicos sin necesidad de la intervención humana.

2.3. LPWAN

Las redes de área amplia de bajo consumo (LPWAN, por sus siglas en inglés) se posicionan como un componente clave en las comunicaciones para el Internet de las cosas (IoT), especialmente en escenarios que demandan gran autonomía, largo alcance, bajo costo y transferencia de pequeñas cantidades de datos [Raza et al., 2017]. A diferencia de otras tecnologías de comunicación como WiFi, Bluetooth, ZigBee o NFC, LPWAN ofrece enlaces de mayor alcance y una mayor escalabilidad, permitiendo la conexión de un mayor número de dispositivos. Comparadas con las tecnologías celulares como 2G, 3G o 4G, las LPWAN se destacan por su menor consumo energético, lo que se traduce en una mayor autonomía, reducción de costos de los dispositivos y simplificación en la conectividad de nuevos dispositivos [Khutsoane et al., 2017].

Entre las tecnologías LPWAN más conocidas se encuentran LoRa, Sigfox y NB-IoT. Actualmente, Sigfox y LoRa son las más populares, ya que operan en las bandas de radio libres ISM (Industrial, Scientific, Medical). Estas bandas permiten la operación sin necesidad de licencia, siempre que se respeten las restricciones de potencia radiada, ancho de banda y ciclo de transmisión. En América, la banda utilizada es de 915 MHz [Mazar, 2014].

Por otro lado, NB-IoT es una tecnología estandarizada por el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP) que opera en bandas de frecuencia con licencia, asignadas a operadores de telefonía móvil, aprovechando así la infraestructura existente. Aunque se basa en una versión simplificada del protocolo LTE, NB-IoT requiere más energía que Sigfox y LoRa debido a su comunicación síncrona, el manejo de la calidad de servicio (QoS) y el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA). Aunque NB-IoT ofrece el rendimiento más alto y la latencia más baja, presenta desventajas como un rango de cobertura más limitado y la falta de cobertura LTE en ciertas áreas suburbanas [Mekki et al., 2019].

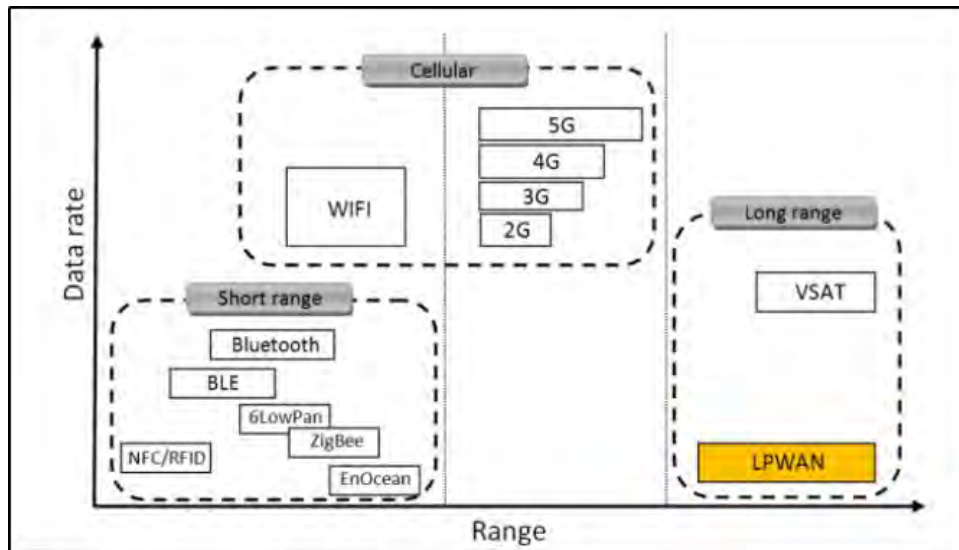


Figura 2.2: Posicionamiento de la tecnología LPWAN. Se muestra una comparativa entre la velocidad de datos (data rate) y el rango de operación (range). Fuente: tomado de [Mekki et al., 2019].

2.4. Topologías y Arquitecturas LPWAN

Esta sección resume las topologías de conectividad aplicables a las redes LPWAN y el marco arquitectónico en base a los estudios realizados por [Chaudhari and Zennaro, 2020]. Desde el punto de vista de la topología, las redes LPWAN se pueden clasificar en dos grupos principales: estrella y malla. Las redes LPWAN pueden configurarse en cualquiera de estos grupos si cuenta con la compatibilidad de los dispositivos.

2.4.1. Topologías LPWAN

En la Figura 2.3 (a) se muestra una red en estrella, compuesta por un nodo de puerta de enlace al que se conectan todos los demás nodos. En este tipo de red, los nodos solo pueden comunicarse entre sí a través de la puerta de enlace. Los mensajes generados por los nodos se transmiten a un servidor central mediante este nodo común. Cada nodo envía sus mensajes a la puerta de enlace, que a su vez los reenvía al servidor de red, donde se llevan a cabo comprobaciones de seguridad, detección de errores y control de

redundancia. Las redes en estrella son rápidas y confiables debido a su estructura de salto único. Además, los nodos defectuosos pueden identificarse y aislarse fácilmente. No obstante, si la puerta de enlace falla, todos los nodos conectados a ella se vuelven inaccesibles.

Por otro lado, la topología de malla, representada en la Figura 2.3 (b), incluye un nodo de puerta de enlace, nodos de sensor y nodos de enrutamiento interconectados. En una topología de malla completa, todos los nodos pueden conectarse directamente entre sí, mientras que en una topología de malla parcial, algunos nodos están conectados solo a aquellos con los que intercambian más mensajes.

Las redes de malla presentan varias ventajas, como la disponibilidad de múltiples rutas para la transmisión de datos, la posibilidad de realizar transmisiones simultáneas *upstream* y *downstream*, la escalabilidad fácil de la red y su capacidad de recuperación automática. Sin embargo, también presentan desventajas, como la complejidad añadida por los nodos redundantes, la latencia adicional generada por la comunicación de múltiples saltos y el incremento en los costos tecnológicos. Además, la redundancia de nodos puede afectar negativamente la eficiencia energética de la red.

Generalmente, la topología en estrella es preferida para LPWAN en lugar de las redes de malla, ya que permite un mejor ahorro de energía de la batería y extiende el rango de comunicación. La conectividad de largo alcance de LPWAN posibilita que estas redes de un solo salto accedan a un gran número de nodos, lo que reduce los costos operativos.

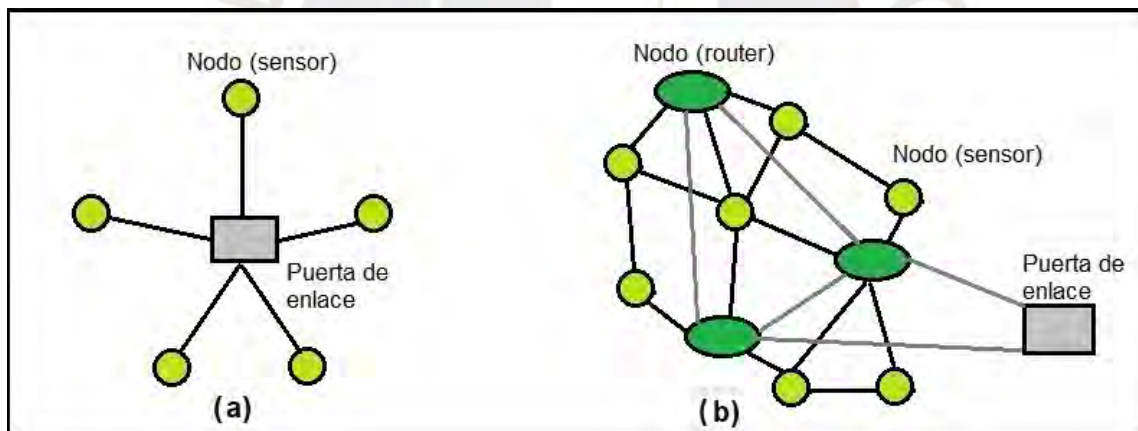


Figura 2.3: (a) Topología en estrella, (b) Topología de red en malla. Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Arquitectura estándar LPWAN

La arquitectura LPWAN básica requiere acceso inalámbrico y conectividad a Internet y la nube. La tecnología LPWAN típica puede requerir un conjunto seleccionado de entidades, como se muestra en la Figura 2.4.

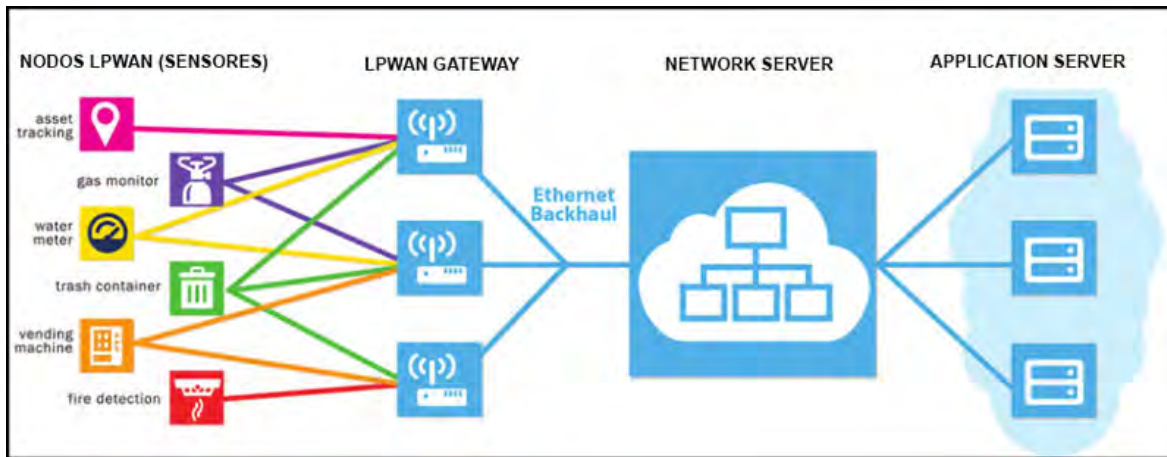


Figura 2.4: Entidades típicas de las redes de área amplia y de baja potencia (LPWAN). Fuente: Elaboración propia basado en [Jamali-Rad et al., 2018].

- **Nodos LPWAN:** Su función principal es recopilar datos y responder a las entradas de la red LPWAN. Los datos recopilados se envían mediante un enlace de radio específico hacia una estación de acceso inalámbrico y la red IoT.
- **Puerta de enlace (Gateway):** Proporciona el enlace de radio necesario para la gestión de dispositivos y el intercambio de tráfico de datos. Dependiendo de la tecnología, un Gateway puede ofrecer almacenamiento y computación en el borde (edge computing) para descargar la nube, lo cual es útil en aplicaciones que requieren soporte en tiempo real y baja latencia.
- **Servidor LPWAN:** Se encarga del aprovisionamiento, registro y operación de los nodos LPWAN. También puede compartir o mejorar funcionalidades centrales como enrutamiento de tráfico, seguridad y manejo de prioridades junto con el gateway.
- **Servidores de aplicaciones y la nube:** Estos apoyan a la LPWAN mediante la gestión de la base de datos que contiene los mensajes recibidos de los dispositivos conectados. Utilizan análisis de big data para examinar y actuar sobre los datos recopilados.

2.4.3. Arquitectura híbrida LPWAN

Mejoras en las estaciones base tradicionales

En la literatura, se proponen arquitecturas novedosas que consideran añadir funcionalidades a las estaciones base GPRS/3G/LTE/5G para soportar conexiones LPWAN. La Figura 2.5 muestra cómo diferentes tecnologías inalámbricas, como ZigBee y Wi-Fi (IEEE 802.15.4), establecen comunicación inalámbrica con una estación base.

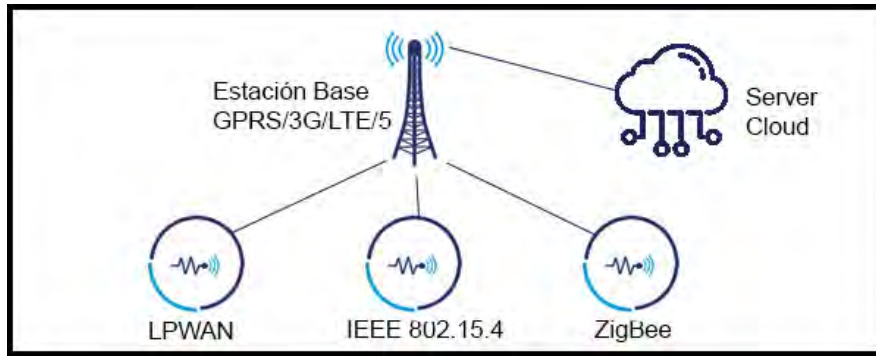


Figura 2.5: Arquitectura híbrida LPWAN. Fuente: Elaboración propia.

Combinaciones de redes LoRa, Sigfox, LoraWAN

En la Figura 2.6 se muestra una arquitectura que utiliza múltiples redes LPWAN para proporcionar diferentes interfaces de conectividad a los nodos. Los nodos tienen acceso a las redes LoRa, Sigfox y LoRaWAN. Cada gateway recopila datos de los nodos ubicados en su área de cobertura. En el estudio de [Rubio-Aparicio et al., 2019], se propone la conexión entre los diferentes gateways LPWAN, eliminando así la limitación de conexión de los nodos; es decir, los nodos tienen la posibilidad de enviar datos a diferentes tecnologías LPWAN. En una arquitectura mixta de este tipo, el servidor de red asociado o las entidades de la red central realizan funciones de gestión de dispositivos tales como registro, autenticación, asignación de recursos y gestión del tráfico de datos a los dispositivos conectados a su red.

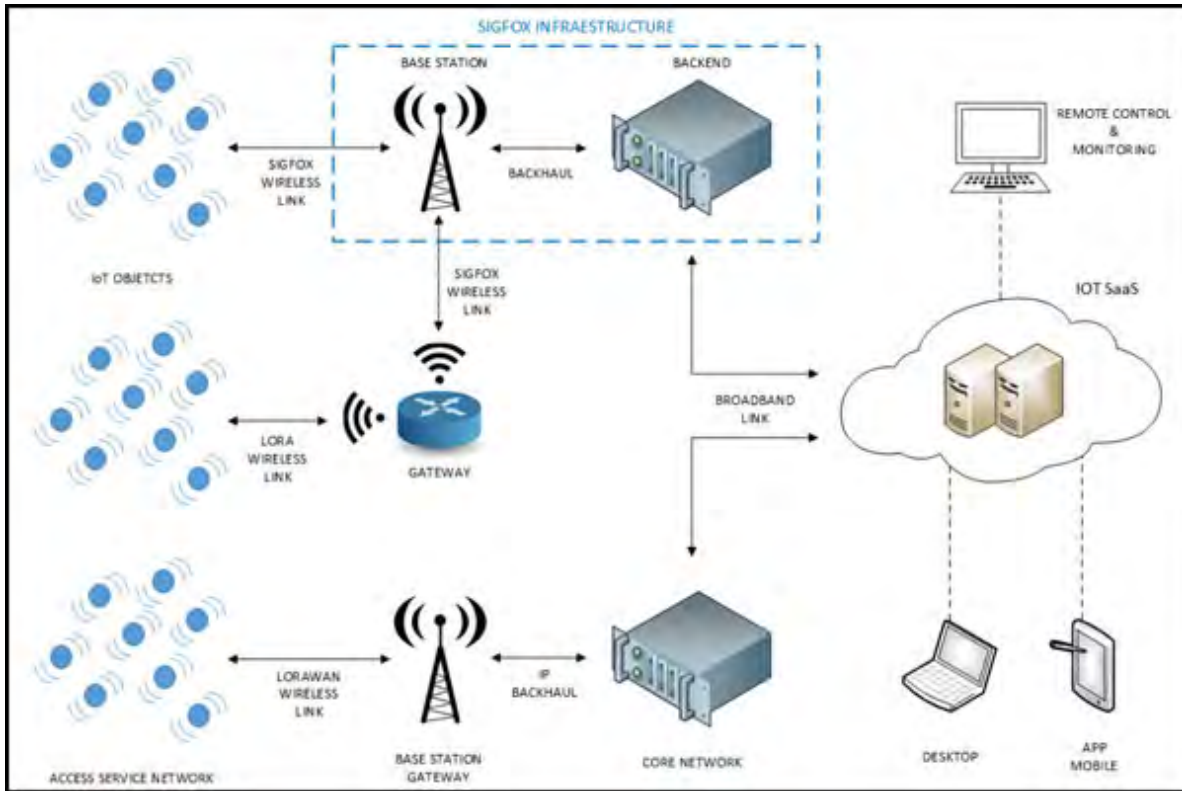


Figura 2.6: Arquitectura mixta LPWAN. Fuente: Tomado del estudio propuesto por Rubio y Aparicio publicado en [Rubio-Aparicio et al., 2019].

2.5. Tecnológicas LPWAN

2.5.1. LoRa y LoRaWAN

LoRa es una tecnología de capa física que opera en bandas ISM sin licencia, tales como 868 MHz en Europa, 915 MHz en Norteamérica, y 433 MHz en Asia. Se basa en la técnica de espectro ensanchado por chirrido (CSS) [Semtech, 2015], que es una modulación de frecuencia lineal de banda ancha donde la frecuencia de la portadora varía durante un tiempo definido.

LoRa funciona como una tecnología de un solo salto, transmitiendo los mensajes recibidos de los nodos sensores al servidor central a través de gateways compatibles con LoRa. La velocidad de transmisión de datos admitida por LoRa depende del ancho de banda (250 kHz, 500 kHz), así como también del factor de dispersión. Las transmisiones LoRa con diferentes factores de dispersión son cuasi-ortogonales, permitiendo múltiples transmisiones con diferentes factores de dispersión simultáneamente [Croce et al., 2018].

Para soportar LoRa en Internet, la Alianza LoRa ha desarrollado LoRaWAN, que incluye funcionalidades de red y de capa superior. LoRaWAN proporciona tres clases de dispositivos finales para abordar los diferentes requisitos de una amplia gama de aplicaciones IoT, como los requisitos de latencia [LoRa Alliance, 2020]. Las tres clases de dispositivos finales son:

- **Clase A:** Es la más eficiente en términos de consumo energético. Cada nodo de Clase A abre dos ventanas de recepción de tiempo corto después de cada transmisión, lo que permite la comunicación bidireccional con el servidor de la red. Esta clase es ideal para aplicaciones donde los datos se envían de manera ocasional y no se requiere respuesta inmediata, como en sensores de monitoreo ambiental.
- **Clase B:** Esta clase proporciona ventanas de recepción programadas adicionalmente. Los dispositivos de Clase B reciben balizas periódicas de la red que les permiten sincronizarse con el servidor. Esto permite a los servidores programar mensajes descendentes en ventanas de recepción específicas, lo que es útil para aplicaciones donde se necesita un equilibrio entre el consumo de energía y la latencia, como en sistemas de control remoto.
- **Clase C:** Los dispositivos de Clase C tienen una ventana de recepción casi continua, cerrando solo cuando están transmitiendo. Esto proporciona la menor latencia posible para mensajes descendentes, pero a costa de un mayor consumo de energía. Es adecuada para aplicaciones donde la latencia baja es crítica y la energía está más disponible, como en actuadores conectados a fuentes de alimentación.

2.5.2. Sigfox

Sigfox es una tecnología LPWAN de banda ultra estrecha patentada que utiliza una tasa de modulación lenta para lograr un mayor alcance. Inicialmente, Sigfox solo admitía comunicación de enlace ascendente unidireccional, es decir, entre los nodos y el gateway, utilizando la modulación diferencial binaria por desplazamiento de fase (DB-PSK). En versiones posteriores, se implementó la comunicación bidireccional, donde se utiliza la modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana (GFSK) para el enlace descendente. La banda ultra estrecha que utiliza Sigfox permite que el receptor escuche solo en una pequeña porción del espectro, mitigando así el efecto del ruido [Sigfox Company, 2020].

Existen una amplia variedad de nodos y gateways compatibles con esta tecnología. Sigfox admite una velocidad de datos muy baja en comparación con otras tecnologías LPWAN. Para brindar confiabilidad, Sigfox transmite el mensaje varias veces, lo que resulta en un mayor consumo de energía. Una de las principales diferencias entre Sigfox y LoRa es la distinción comercial: Sigfox es implementado por operadores de red y los usuarios deben pagar cargos de suscripción, mientras que LoRa puede ser implementado como una red independiente sin cargos de suscripción.

Se ha demostrado que una puerta de enlace Sigfox puede manejar hasta un millón de objetos conectados, con un área de cobertura de 30 a 50 km en zonas rurales y de 3 a 10 km en zonas urbanas [Awadallah et al., 2019].

2.5.3. NB-IoT

El IoT de banda estrecha (NB-IoT) es una tecnología LPWAN de la versión 13 del 3GPP que ofrece la flexibilidad de implementación al permitir el uso de una pequeña parte del espectro disponible en las bandas de LTE. Como tecnología 3GPP, NB-IoT puede coexistir con el sistema global de comunicaciones móviles (GSM) y LTE en bandas de frecuencia con licencia de 700 MHz, 800 MHz y 900 MHz. Admite comunicación bidireccional donde se utiliza el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) para el enlace descendente y el acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA) para el enlace ascendente [Hoglund et al., 2017]. Conecta hasta 50K dispositivos por celda y requiere un mínimo de 180 kHz de ancho de banda para establecer comunicación. NB-IoT también se puede implementar como portadora independiente con un espectro de más de 180 kHz dentro del bloque de recursos físicos LTE. NB-IoT está diseñado optimizando y reduciendo las funcionalidades de LTE para que pueda usarse para transmisiones de datos poco frecuentes y con bajos requisitos de energía [Akpakwu et al., 2018]. La velocidad de datos admitida es 200 kbps para el enlace descendente y 20 kbps para el enlace ascendente. El tamaño máximo de carga útil para cada mensaje es de 1600 bytes.

2.5.4. Ingenu

Ingenu se basa en la técnica patentada de acceso múltiple de fase aleatoria (RPMA) con regulaciones de espectro más flexibles, lo que permite un mayor rendimiento y capacidad [Ingenu, 2020]. La solución es propietaria en el sentido de que la empresa es el único desarrollador y fabricante del hardware. Utiliza una técnica de espectro ensanchado de secuencia directa con una velocidad máxima de datos de hasta 80 kbps. Ingenu opera en la banda de 2.4 GHz, lo que le da un rango más corto que Sigfox y LoRa, y también encuentra más pérdida de propagación por obstrucciones, como agua o tierra compacta. La banda de 2,4 GHz es ampliamente utilizada por muchas otras tecnologías de red de área local y personal, como Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee, lo que la hace más congestionada y, por lo tanto, aumenta el nivel de interferencia. Ofrece comunicación bidireccional, robusta y de bajo consumo. Para agregar confiabilidad a la transmisión, proporciona transmisión reconocida. Como tiene velocidades de transmisión de datos más altas, el consumo de energía es mayor que Sigfox y LoRa [Queralta et al., 2019]. Ingenu se diseñó originalmente y se centró en aplicaciones en los sectores de servicios públicos, petróleo y gas. En la actualidad, se propone para una diversa gama de aplicaciones como ciudad inteligente, agricultura, seguimiento de activos, gestión de flotas y redes inteligentes, entre otras.

2.5.5. Telensa

Telensa es una tecnología LPWAN de banda ultra-estrecha. Funciona en bandas ISM sin licencia de 868 MHz y 915 MHz. Tiene capacidades de comunicación bidireccional y, por lo tanto, puede usarse tanto para monitoreo como para control. Tiene un sistema de gestión central (CMS) llamado Telensa PLANet, que se utiliza para operaciones de extremo a extremo. Ha sido adoptado para aplicaciones inteligentes de alumbrado público.

Consiste en nodos inalámbricos que conectan luces individuales en una red dedicada [Finnegan and Brown, 2018]. CMS reduce el consumo total de energía y los costos de mantenimiento a través de su sistema automático de detección de fallas. Estos nodos de sensores en los postes de alumbrado público se pueden utilizar para recopilar los datos de varios parámetros como contaminación, nivel de ruido, temperatura, humedad, nivel de radiación, etc., según sea necesario en las aplicaciones de ciudad inteligente. Una estación base de Telensa puede controlar 5000 nodos con baja potencia durante unos 2 km en zonas urbanas y 4 km en zonas rurales. Admite la integración con servicios de soporte, como sistemas de gestión de activos, medición y facturación. Actualmente Telensa está disponible en más de 30 países en todo el mundo.

2.5.6. Qowisio

Qowisio es una tecnología de modo dual de banda ultra estrecha para aplicaciones LPWAN. Es compatible con LoRa y ofrece opciones tecnológicas y flexibilidad a los usuarios finales [Qowisio, , Zemrane et al., 2019]. Ofrece conectividad como servicio a los usuarios finales al proporcionar los dispositivos finales, implementar la infraestructura de red, desarrollar aplicaciones personalizadas y alojarlas en una nube de back-end. Qowisio tiene una gama completa de dispositivos inteligentes que admiten diferentes aplicaciones, como administración de activos, control de perímetro, detección de movimiento, iluminación, monitoreo de parámetros ambientales, monitoreo de energía y potencia, seguimiento y varios otros.

2.5.7. Nwave

Nwave LPWAN es principalmente una solución desarrollada por Nwave [Nwave, 2020] para sistemas de estacionamiento inteligentes. Esta tecnología de banda ultra estrecha también se basa en la operación de banda ISM sin licencia por debajo de 1 GHz. Afirma un largo alcance y una alta densidad de nodos en comparación con Sigfox y LoRa a costa de un mayor consumo de energía [Pham et al., 2019]. Funciona en una topología en estrella y admite la movilidad de los nodos. El nodo final de Nwave transmite potencia de 25 mW a 100 mW, cubriendo así una distancia más larga para la velocidad de datos de hasta 100 bps. También reclama una cobertura de hasta 7 km y 8 años para la batería de nodo incorporada. Tiene su propio sistema de software de gestión y recopilación de datos en tiempo real para el seguimiento y el control.

2.5.8. Weightless

Weightless Special Interest Group (Weightless - SIG) propuso Weightless, un estándar abierto que ofrece conectividad LPWAN. Hay tres versiones de ingrúvido: Weightless-W, Weightless-N y Weightless-Weightless-P. Está diseñado para operar en el espectro de espacios en blanco de TV (TVWS) (banda de 470 MHz a 790 MHz), y tiene una mejor propagación de señal en comparación con Weightless-N y admite una amplia gama de códigos de expansión y técnicas de modulación como DBPSK y modulación de amplitud en cuadratura (QAM). El tamaño del paquete de datos puede ser de hasta

10 bytes con un rendimiento que varía de 1 kbps a 10 Mbps, sujeto al presupuesto de enlace y otras configuraciones [Weightless,]. Para mejorar la eficiencia energética, los nodos finales se comunican con la puerta de enlace con un espectro reducido y con baja potencia [Adelantado et al., 2016]. Como el uso de TVWS no está permitido en muchos países, Weightless - SIG ha introducido otras dos variaciones, a saber. Weightless-N y Weightless-P. Weightless-N (nWave) es similar a Sigfox y usa ALOHA ranurado en la banda sin licencia, que admite solo comunicación unidireccional para dispositivos finales a la estación base. Alcanza un enlace de comunicación de hasta 3 km con una velocidad de datos máxima de 100 kbps. Weightless-P utiliza la codificación por desplazamiento mínimo gaussiano (GMSK) y la codificación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK) en la banda sin licencia y ofrece comunicación bidireccional con soporte para reconocimientos. Alcanza una velocidad de datos de alrededor de 100 kbps, tiene un rango de comunicación comparativamente más corto (2 km) y tiene una duración de batería más corta.

2.5.9. LTE-M

LTE-M también es una tecnología basada en el estándar 3GPP y opera en el espectro LTE con licencia. Es compatible con redes LTE y proporciona la conexión para el tráfico de máquina a máquina (M2M). Además, la ruta de migración de las redes heredadas 2G y 3G está disponible. Proporciona una cobertura ampliada en comparación con las redes LTE, una cobertura para aplicaciones M2M similar a las redes 5G y ofrece un camino perfecto hacia la solución 5G M2M [Mekki et al., 2019]. LTE-M se centra en proporcionar velocidades de datos variables y soporte para aplicaciones en tiempo real y no tiempo real. Admite aplicaciones de baja latencia, así como aplicaciones de tráfico diferido que pueden operar con latencias en el rango de unos pocos segundos. Tiene requisitos de baja potencia y admite operaciones que alcanzan una velocidad de transmisión de hasta 1 Mbps. También es compatible con dispositivos con una amplia gama de tamaños de mensajes. Como se deriva de LTE como base, la movilidad se admite como parte de la funcionalidad LTE estándar, pero no en escenarios de cobertura extendida [Sharma and Wang, 2020]. Es un software actualizable desde LTE. Tiene capacidad para más de 100 000 dispositivos por estación base para aplicaciones donde los dispositivos tienen requisitos de rendimiento de datos muy bajos.

2.5.10. DASH7

DASH7, también conocido como DASH 7 Alliance Protocol (D7AP), fue desarrollado para comunicaciones inalámbricas de sensores y actuadores y se originó a partir del estándar ISO 18000-7. Una extensión de la tecnología de identificación activa por radiofrecuencia (RFID), DASH7 [Weyn et al., 2013] es una tecnología de banda ISM de largo alcance y baja potencia que opera principalmente a 433 MHz. Sin embargo, también admite la comunicación con otras bandas a 868 MHz y 915 MHz [22]. Utiliza modulación GFSK de dos niveles con un ancho de banda de canal de 25 kHz o 200 kHz junto con funciones de corrección de errores de reenvío y blanqueamiento de datos. Tiene una pequeña pila de protocolos de código abierto que admite una duración de la batería de varios años, baja latencia y más flexibilidad. Se utiliza para tráfico de datos

en ráfagas de baja velocidad de hasta 167 kbps. DASH7 admite la comunicación de múltiples saltos y la movilidad de nodos hasta un alcance de 2 km [Polonelli et al., 2019]. La arquitectura se compone de puntos finales, subcontroladores y puertas de enlace. Los nodos de punto final siguen un programa de ciclo de trabajo estricto, mientras que los subcontroladores recopilan los paquetes de datos de los nodos de punto final con algunos ciclos de suspensión y restricciones de baja energía. Las puertas de enlace están continuamente activas para recopilar los paquetes de los subcontroladores y puntos finales y luego enviarlos al servidor. DASH7 admite la topología de árbol en presencia de subcontroladores o estrella en presencia de los puntos finales.

2.5.11. NB-Fi

La tecnología LPWAN NB-Fi (fidelidad de banda estrecha) está diseñada para aplicaciones de comunicación M2M bidireccionales de banda estrecha, baja potencia y largo alcance [Finnegan and Brown, 2018, Bembe et al., 2019]. Esta solución está diseñada por WavIoT, un proveedor LPWAN de infraestructura como solución (IaaS). Funciona en bandas ISM sin licencia de 868 MHz y 915 MHz, así como en otros espectros sin licencia de sub-GHz. NB-Fi es un protocolo abierto de pila completa con las siete capas del modelo de referencia OSI para una comunicación de sensor robusta, confiable y energéticamente eficiente. Para lograr una mayor eficiencia espectral y rendimiento en las bandas estrechas, emplea algoritmos de utilización del espectro inteligentes y optimizados basados en tecnología SDR, redes neuronales y técnicas de inteligencia artificial. NB-Fi tiene una arquitectura descentralizada, lo que permite que las estaciones base realicen operaciones importantes, lo que la hace más robusta y confiable en caso de falla de la red. Es una solución altamente escalable en la que una estación base NB-Fi puede admitir hasta 2 millones de nodos de sensores. Dado que las bandas ISM por debajo de 1 GHz están abarrotadas, las puertas de enlace están diseñadas para funcionar con un algoritmo que evita interferencias. NB-Fi proporciona cobertura hasta 10 km en áreas urbanas y hasta 30 km en áreas rurales.

2.5.12. EC-GSM-IoT

Cobertura mejorada: Sistema Global para Internet de las cosas móvil (EC-GSM-IoT), desarrollado por 3GPP, es uno de los candidatos prometedores para IoT celular de bajo consumo y largo alcance (cIoT) para proporcionar una cobertura y duración de batería similares a las de NB-IoT [Lippuner et al., 2018]. Se basa en GPRS mejorado y está diseñado para aplicaciones LPWAN escalables y de baja complejidad. Como la mayoría de los dispositivos cIoT actuales se basan en GPRS / EDGE para conectarse a Internet, EC - GSM - IoT proporciona un camino fácil para mejorar la eficiencia energética y una mejora de la cobertura de 20 dB. Se optimiza y mejora mediante actualizaciones de software a redes GPRS/EDGE y también para admitir nuevos dispositivos. El tráfico de dispositivos GSM heredados y EC-GSM-IoT se multiplexa en los mismos canales físicos sin comprometer mucho el rendimiento del tráfico heredado. El ancho de banda del canal EC-GSM-IoT es de 200 kHz. Al igual que GSM, es tecnología FDMA + TDMA + FDD, que admite velocidades de datos pico de 70 kbps y 240 kbps basadas en GMSK y 8PSK, respectivamente. EC-GSM-IoT proporciona una mejora múltiple en la cobertura para

aplicaciones de baja velocidad. También tiene la capacidad de llegar a lugares desafiantes como sótanos interiores profundos [Hwang and Liu, 2019], donde se instalan muchos medidores inteligentes y sensores de estacionamiento, o áreas remotas en las que se implementan sensores para casos de uso de monitoreo de infraestructura o agricultura [TelecomTV, 2020]. Las características importantes de la capa física incluyen nuevos canales lógicos, repeticiones para proporcionar la robustez necesaria para soportar una pérdida de acoplamiento máxima de hasta 164 dB y el uso de CDMA superpuesto para aumentar la capacidad de la celda.

2.5.13. IEEE 802.15.4k

Este estándar ha sido desarrollado por IEEE 802.15.4k Task Group (TG4k) para aplicaciones de monitoreo de infraestructura crítica de baja energía (LECIM). Funciona en bandas ISM de 2,4 GHz y sub-GHz sin licencia con múltiples anchos de banda de canales discretos que van desde 100 kHz a 1 MHz [Raza et al., 2017]. Utiliza espectro ensanchado de secuencia directa (DS-SS) y FSK en la capa física [Vishnevsky et al., 2014]. El MAC se basa en la detección de portadores de acceso múltiple/prevenición de colisiones (CSMA/CA) y funciona con tres enfoques diferentes, a saber. Sin acceso al canal prioritario (PCA), CSMA y ALOHA con PCA. Con PCA, los dispositivos finales y las estaciones base pueden priorizar su tráfico para acceder al medio. Admite topología en estrella y tiene la capacidad de intercambiar mensajes de forma asincrónica. Admite la velocidad máxima de datos de hasta 128 kbps y una cobertura máxima de 5 km.

2.6. Análisis de soluciones IoT

Tal como se describe en el apartado anterior, existen múltiples alternativas tecnológicas que implementan el paradigma IoT [Mekki et al., 2019] [Gaddam and Rai, 2018]. Sin embargo, las tecnologías más sobresalientes de la industria, son: LoraWan, Sigfox y NB-IoT.

2.6.1. Solución basada en LoraWAN

LoRaWAN

Con esta tecnología, el usuario tiene la capacidad de administrar la infraestructura completa de la red, incluyendo la estación base (gateway) y los nodos finales (dispositivos) [LoRa Alliance, 2018]. LoRaWAN opera en bandas de frecuencia no licenciadas, como las bandas ISM (Industrial, Scientific, and Medical), típicamente en 868 MHz en Europa y 915 MHz en América del Norte [LoRa Alliance, 2022]. Esta operación en bandas no licenciadas permite un despliegue más flexible y económico de la red, ya que no se requieren licencias costosas para el espectro de frecuencia.

Los gateways de LoRaWAN actúan como puntos de recolección que reciben las transmisiones de los nodos finales utilizando la modulación LoRa (Long Range), que se

caracteriza por su alta sensibilidad y su capacidad para alcanzar largas distancias, típicamente hasta 15-20 km en áreas rurales y 2-5 km en entornos urbanos [Semtech, 2024]. Los nodos finales pueden ser administrados y configurados de manera remota a través de la red LoRaWAN, permitiendo ajustes en parámetros como la tasa de datos (Spreading Factor, SF), potencia de transmisión y el intervalo de reporte de datos [Thethingsindustries, 2024a].

Además, LoRaWAN soporta mecanismos de seguridad integrados, como la autenticación de dispositivos y la encriptación de datos (AES-128), garantizando la privacidad y la integridad de la información transmitida [LoRa Alliance, 2021]. La tecnología también permite el uso de distintas clases de dispositivos finales (A, B y C), adaptándose a los requisitos de diferentes aplicaciones, desde sistemas de monitoreo ambiental de baja potencia hasta aplicaciones críticas de control industrial que requieren baja latencia [Thethingsindustries, 2024b].

Arquitectura LoRaWAN

La arquitectura de red en la Figura 2.7 combina un nivel de acceso múltiple, donde los nodos finales recopilan y envían datos a la estación base LoraWan Gateway. El *LoraWan Gateway* que sirve como puerta de acceso para los nodos finales, posteriormente la estación base *LoraWan Gateway* establece una conexión a Internet, mediante el cual entrega los datos obtenidos a una plataforma IoT situada en la nube en la modalidad *PaaS*. Los datos recibidos se almacenan y procesan según los parámetros de programación establecidos. Finalmente, la información se pone a disposición de los usuarios a través de centros de monitoreo y plataformas electrónicas.

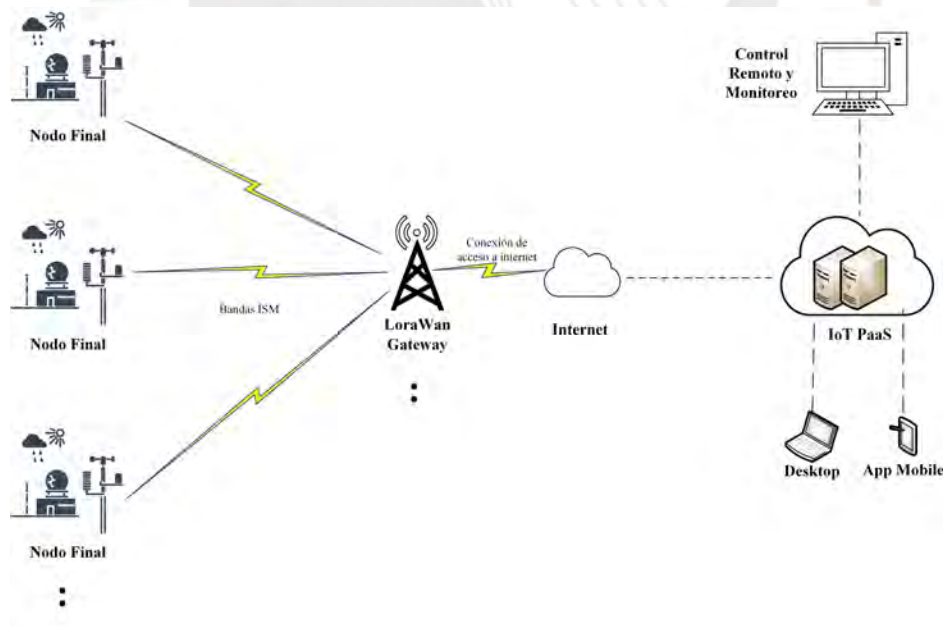


Figura 2.7: Diagrama de la solución empleando la tecnología LoRaWAN. Fuente: Elaboración propia

La tecnología LoRaWAN se encuentra diseñada para operar en bandas de frecuen-

cia ISM no licenciadas, como es el caso de la banda 915 a 928 MHz en el Perú [MTC, 2008]. La carga útil puede tener un máximo de entre 51 y 222 bytes, dependiendo del factor de propagación y tanto en el enlace ascendente como en el descendente [Adelantado et al., 2016], esta característica se adapta a la información generada por las estaciones de monitoreo. Con respecto a la seguridad de la información LoRaWAN incluye autenticación basada en el esquema de cifrado AES128 (Advanced Encryption Standard) y otros estándares de seguridad descrito en IEEE 802.15.4/2006. Asimismo, es ampliamente utilizada en varios países y cuenta con múltiples proveedores de servicios de red tanto gratuitos como de pago, por lo cual existe variedad de proveedores de servicios. Otra ventaja de los dispositivos LoraWAN es la amplia documentación de libre acceso.

2.6.2. Solución basada en SigFox

Sigfox

Con Sigfox, el usuario tiene la capacidad de controlar los nodos finales, mientras que la empresa Sigfox se encarga de administrar el Centro de Operaciones de la Red (Sigfox 0G Network) [Sigfox, 2024c]. Esto significa que la infraestructura de la red, incluidos los gateways y servidores, es gestionada y mantenida por empresas asociadas de Sigfox, lo que simplifica el proceso de despliegue para los usuarios. Los nodos finales de Sigfox están diseñados para operar en bandas de frecuencia tanto licenciadas como no licenciadas, aunque la mayoría de las implementaciones utilizan bandas ISM no licenciadas, como 868 MHz en Europa y 920 MHz en América del Latina [Sigfox, 2024c].

La tecnología Sigfox está optimizada para comunicaciones de baja potencia y bajas velocidades de transmisión, enviando mensajes cortos (hasta 12 bytes) a intervalos configurables para maximizar la vida útil de la batería [Sigfox, 2024d]. El protocolo de comunicación es unidireccional en su mayoría, con una capacidad limitada para la transmisión descendente, lo que permite una operación eficiente en términos de energía. Los nodos finales envían datos a los servidores de Sigfox, donde se procesan y reenvían a los sistemas de backend del usuario a través de APIs [Sigfox, 2024b].

La seguridad en Sigfox se gestiona a través de mecanismos como el cifrado y la autenticación de los mensajes, lo que garantiza la integridad y confidencialidad de los datos. Dado que la red es administrada centralmente por Sigfox, los usuarios no necesitan preocuparse por la gestión de la infraestructura de la red, lo que permite un enfoque más directo en el desarrollo y despliegue de aplicaciones IoT.

Arquitectura Sigfox

La arquitectura empleando la tecnología Sigfox presenta un diseño similar a la solución LoRaWAN, tal como se muestra en la Figura 2.8, sin embargo, Sigfox es un operador de red que brinda una solución completa. Su ámbito de operación cubre desde la recolección de datos en cualquier área del mundo bajo cobertura hasta la transferencia de estos datos. El modelo de negocio de Sigfox se basa en la facturación por la conectividad proporcionada a los dispositivos. Desde 2009, Sigfox ha tenido un rápido crecimiento y

hasta 2024 se encuentra disponible en más de 70 países [Sigfox, 2024a]. Actualmente, cada estación base alcanza un área de 3 a 10 km en entornos urbanos y de 30 a 50 km en áreas rurales, ofreciendo diferentes servicios para hasta 1 millón de dispositivos [Centenaro et al., 2016].

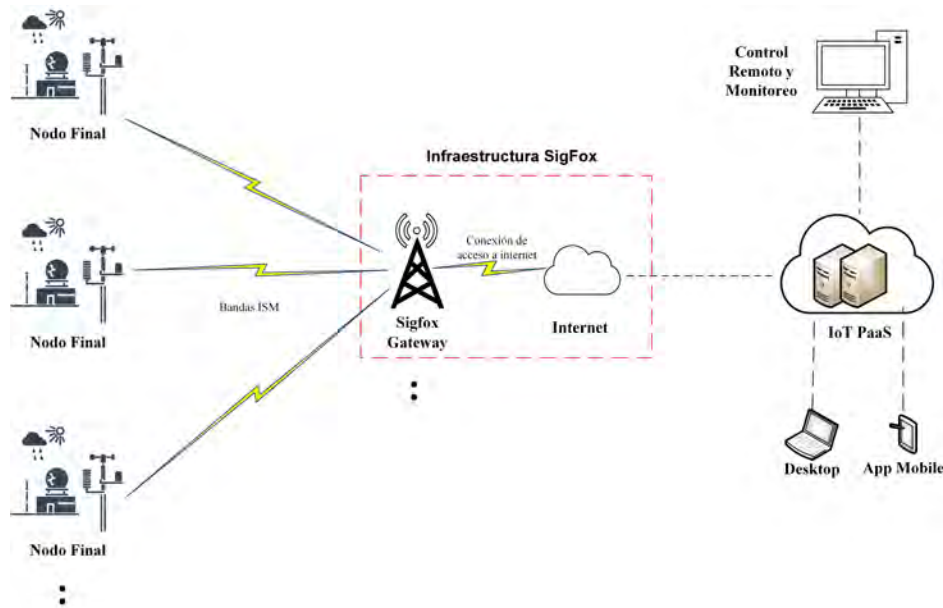


Figura 2.8: Diagrama de la solución empleando la tecnología SigFox. El modelo de negocio se basa en la venta de conectividad IoT, de esta forma controlan la infraestructura desde los puntos finales hasta el gateway de la estación base. Fuente: Elaboración propia

2.6.3. Solución basada en NB-IoT

NB-IoT

En NB-IoT, el operador de la red controla las estaciones base, mientras que el usuario tiene acceso únicamente a los nodos finales [GSMA, 2018]. Las operaciones de NB-IoT se realizan en bandas licenciadas, lo que significa que utiliza espectro de frecuencia controlado y asignado específicamente para operadores móviles. Esto permite una comunicación más confiable y menos interferencias en comparación con las bandas no licenciadas, garantizando una mayor calidad de servicio (QoS) [Everythingrf, 2018].

NB-IoT está diseñado para ofrecer una conectividad eficiente para dispositivos IoT que requieren una transmisión de datos de baja velocidad y cobertura en áreas difíciles, como sótanos o zonas rurales. Utiliza una arquitectura de red simplificada que puede integrarse con la infraestructura LTE existente, facilitando la expansión de la red por parte de los operadores [Zayas and Merino, 2017]. Los nodos finales NB-IoT pueden ser configurados para un consumo de energía muy bajo, lo que les permite tener una vida útil de la batería de hasta 10 años, gracias a características como el Power Saving Mode (PSM) y el eDRX (Extended Discontinuous Reception) [GSMA, 2022].

En cuanto a la seguridad, NB-IoT hereda las medidas de seguridad de las redes móviles,

como la autenticación de dispositivos y el cifrado de datos, asegurando la integridad y la confidencialidad de las comunicaciones [GSMA, 2019].

Arquitectura NB-IoT

La arquitectura de red aplicando la tecnología NB-IoT, se define en el uso de bandas licenciadas como técnica de acceso al medio, estableciendo la relación inicial entre los nodos finales y la estación base LTE (eNodeB). En la Figura 2.9 se observa la coexistencia del gateway NB-IoT sobre la estación base eNodeB, la cual forma parte de la arquitectura del operador móvil que brinda servicios LTE. En la solución propuesta, los nodos finales se conectan a las estaciones base de un operador móvil, quién se encarga del transporte y seguridad de los datos desde el nodo final de monitoreo hasta el almacenamiento en un servidor dispuesto en la nube.

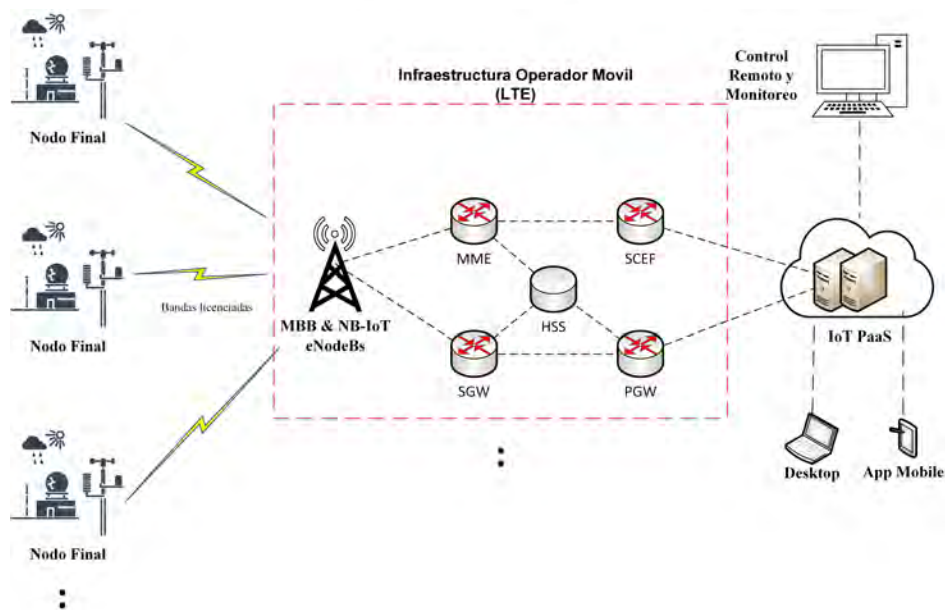


Figura 2.9: Diagrama de la solución empleando la tecnología NB-IoT. Se observa la estrecha relación con los componentes que conforman una red móvil LTE. Fuente: Elaboración propia

Aunque la tecnología NB-IoT garantiza la integridad de los datos porque opera en bandas licenciadas y reduce el ruido en las señales. En Perú, este mercado aún no ha sido cubierto por los operadores móviles. Esto se refleja en el mapa cobertura NB-IoT y LTE-M que proporciona la GSMA [GSMA,]. El mapa muestra los despliegues comerciales de NB-IoT, donde, se observa que en el Perú no existe ningún operador con el servicio activo.

2.6.4. Comparación entre Sigfox, LoraWAN y NB-IoT

En la Tabla 2.1, se muestra una comparación de las características técnicas de LoraWan, Sigfox y NB-IoT. El mercado IoT actualmente ofrece equipos de grado industrial

resistentes a climas hostiles [Ikpehai et al., 2019]. Con respecto a la transferencia de datos se observa que NB-IoT posee la mayor capacidad de *payload*, sin embargo, el despliegue de dicha tecnología por parte de las operadoras móviles en el Perú es nula. Lo mismo sucede con la tecnología Sigfox. La tecnología LoraWAN posee un consumo energético menor en comparación a las otras alternativas.

Criterio	LoraWAN	Sigfox	NB-IoT
Condiciones extremas de operación	Soporta	Soporta	Soporta
Capacidad del Payload	243 bytes	12 bytes (UL) 4 bytes (DL)	1600 bytes
Consumo promedio de energía	68.9 mA	153.2 mA	149.9 mA
Modelo de operación	El usuario controla los nodos finales y el Gateway de LoraWAN.	El usuario solo controla los nodos finales. Sigfox controla la red core del Gateway.	El usuario solo controla los nodos finales. El operador controla la red core del Gateway.
Certificación de los Gateway de acceso	No requiere certificación.	Un Gateway Sigfox requiere una certificación de la empresa	Los Gateway se encuentran certificados
Ecosistema de terminales	Amplio ecosistema de terminales en el mundo.	No existen despliegues de la red Sigfox en el Perú	Los operadores móviles en el Perú no brindan el servicio de conectividad NB-IoT.
Licenciamiento de servicios en nube	Los pagos se realizan de acuerdo al consumo de recursos.	Los pagos se realizan de acuerdo al consumo de recursos.	Los pagos se realizan de acuerdo al consumo de recursos.

Tabla 2.1: Cuadro comparativo de tecnologías de solución. Fuente: Elaboración propia.

2.7. Aplicaciones LPWAN

Las aplicaciones de LPWAN en el monitoreo ambiental de montaña son diversos y atienden diferentes problemáticas, sin embargo, la transmisión de datos es una solución en común. Un ejemplo destacado lo encontramos en el trabajo de [Wang et al., 2022a], donde se emplea la tecnología LoRa en un sistema de monitoreo en tiempo real para

medir los movimientos internos de glaciares. En este sistema, la red LoRa transmite los datos desde sensores ubicados dentro del glaciar hacia una estación base en la superficie. Posteriormente, los datos se envían a la nube a través de redes 4G o satelitales. Sin embargo, es importante señalar que este estudio no incluyó pruebas en condiciones reales de operación.

Otro ejemplo se muestra es el trabajo de [Filhol et al., 2023], en el cual se implementó una red meteorológica en el archipiélago de Svalbard, Noruega. En este caso, se utilizaron placas electrónicas Waspote de Libelium, integradas con sensores meteorológicos y dos canales de comunicación: LoRa y Xbee. Este estudio demostró que las tecnologías innovadoras, como los sensores de bajo costo y la comunicación LoRa, pueden funcionar de manera eficiente en comparación con las tecnologías tradicionales, incluso en las difíciles condiciones ambientales de grandes glaciares.

En el estudio [Dini et al., 2021], LoRaWAN se empleó para la detección de deslizamientos de rocas en las regiones montañosas del Tíbet y Nepal. En este caso, se utilizaron sensores acelerómetros que detectan cambios milimétricos en el movimiento de las rocas, y los datos se transmiten mediante un gateway LoRaWAN, que envía la información a través de la red 2G.

Además, las aplicaciones de monitoreo de volcanes con LPWAN también han mostrado resultados interesantes. En el trabajo de [Evita, 2021], se utilizaron sensores de temperatura del aire, gases y acelerómetros, junto con placas electrónicas Arduino y módulos de comunicación LoRa, para detectar erupciones volcánicas tempranas. De manera similar, en el trabajo de [Terray et al., 2020] se implementó una red de monitoreo del gas radón en los cráteres de los volcanes. Esta red se desarrolló utilizando un gateway LoRaWAN (Wirnet IoT Station), el cual retransmite los datos a través de la red 3G.

Aunque los estudios mencionados se centran principalmente en la detección de actividad volcánica, también se han desarrollado sistemas de alerta temprana para inundaciones originadas en cráteres volcánicos. Tal es el caso del estudio de [Suwarno et al., 2021], donde se emplearon microcontroladores ESP32 y sensores pluviométricos para medir las precipitaciones, y los datos se transmitieron mediante mensajes SMS y WhatsApp, proporcionando así una herramienta efectiva para la alerta temprana.

2.8. Tecnología WiFi

La tecnología de comunicaciones inalámbrica conocida como WiFi ha experimentado una evolución significativa desde su lanzamiento en 1997. Su versión más reciente está estandarizada bajo el nombre WiFi 6, conforme al estándar IEEE 802.11ax. Aunque su aplicación más común se encuentra en entornos domésticos, también ha encontrado su lugar en aplicaciones industriales.

2.8.1. Bandas de Frecuencia

El espectro de operación de los radios WiFi ha evolucionado desde la publicación del estándar 802.11 (1997). En este estándar, el espectro de operación fue la banda de 2.4

GHz. Con la publicación del estándar 802.11a (1999), se implementó el funcionamiento en la banda de 5 GHz. Posteriormente, con el estándar 802.11n (2009), se implementó su funcionamiento en las bandas 2.4 GHz y 5GHz simultáneamente. En la versión más reciente de 802.11ax (2021), se expande la frecuencia de operación hasta los 6 GHz [Ruth, 2023].

2.8.2. Modulación

Es el proceso mediante el cual se combina una señal electromagnética llamada señal portadora con otra señal llamada moduladora. La resultante de la combinación es la señal modulada que se envía mediante el canal de comunicación.

En las redes WiFi, la señal portadora opera en las frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz. Esta elección se fundamenta en la necesidad técnica de que la señal pueda viajar largas distancias sin perder demasiada potencia. La decisión de utilizar frecuencias más altas se basa en el hecho de que las señales de alta frecuencia son menos propensas a ser absorbidas por los objetos en comparación con las señales de baja frecuencia, como lo explicó [Stokes, 2010]. La razón detrás de esta diferencia radica en que las señales de alta frecuencia poseen longitudes de onda más cortas, lo que hace que las partículas o estructuras del medio, si son más pequeñas que la longitud de onda, sean menos propensas a interactuar significativamente con la onda en su propagación.

Los tipos de modulación han variado en función de la evolución de los estándares IEEE 802.11. En la primera generación, se implementó la modulación DSSS, que permitía alcanzar velocidades de 1-2 Mbits. Posteriormente, con la introducción de OFDM y sus variantes como MIMO-OFDM, MU-MIMO y OFDMA, se lograron mejoras significativas en las velocidades, alcanzando hasta 1.2 Gbits [Gabo, 2023].

2.8.3. Seguridad

Mediante WiFi, los usuarios reciben y transmiten sus datos a través de señales inalámbricas moduladas que se propagan en el ambiente hasta llegar al receptor. Este receptor demodula la señal y decodifica los datos para su uso. Sin embargo, debido a diversos efectos físicos, como el multi trayecto, la señal es susceptible de ser captada y decodificada por receptores no autorizados que no forman parte de la red. Este escenario representa una vulnerabilidad para los usuarios, ya que, si la red no implementa un mecanismo de confidencialidad de los datos, estos podrían caer en manos de agentes externos que podrían hacer un uso indebido de la información. Los mecanismos de seguridad que se implementan en las redes WiFi se basan en procesos de cifrado de paquetes de datos, a continuación los métodos más comunes:

WEP

El primer protocolo de seguridad que se implementó en las redes WiFi fue WEP (Wireless Equivalent Privacy), el cual utilizaba el algoritmo de cifrado RC4 (Rivest Cipher

4). Sin embargo, se descubrieron debilidades significativas en este algoritmo que lo hacían vulnerable a ataques de fuerza bruta debido a su dependencia de una clave corta conocida como clave WEP. Adicionalmente, se encontró una debilidad en el algoritmo RC4 que permitía a los atacantes recolectar suficiente tráfico de paquetes cifrados para luego reconstruir la clave WEP. Estas vulnerabilidades hicieron que WEP fuera considerado inseguro y poco confiable como método de protección en las redes WiFi [Vinjosh Reddy et al., 2010].

WPA y WPA 2

Representan una mejora al protocolo de seguridad WEP. Con este tipo de seguridad se introducen los conceptos como Clave Pre-Compartida (PSK) y Clave de Sesión Temporal (TSK). En este enfoque, los usuarios utilizan la clave PSK para autenticarse en la red, si el Access Point valida la PSK genera una TSK mediante la cual se cifran los paquetes de datos, esta clave temporal se renueva frecuentemente para evitar ataques en la red. Los algoritmos de cifrados empleados en los protocolos WPA y WPA2 son el TKIP (Temporal Key Integrity Protocol) y el AES (Advanced Encryption Standard) respectivamente. En 2017, se desarrolló un ataque de reautenticación (KRACK), que permite a un atacante interceptar y manipular datos en una conexión WiFi asegurada mediante WPA2 [Vanhoeft, 2017].

WPA3

Es una mejora en el protocolo WPA2, donde se reemplaza la PSK por el Protocolo de Autenticación Simultánea de Iguales (SAE), dicho protocolo mejora la tolerancia de la red frente a ataques de fuerza bruta. También se introduce el concepto de Individualización de Cifrado, donde cada dispositivo conectado a la red tiene un cifrado dedicado. Además, se resuelve la vulnerabilidad KRACK aumentando hasta 256 la longitud de bits de cifrado que se emplea en AES [Esteban, 2021].

2.8.4. Interferencias

Las interferencias son señales existentes en el medio de comunicación inalámbrica que afectan el desempeño de la red. Dichas señales provienen de diferentes emisores como equipos domésticos (hornos microondas, radios, ruteadores y puntos de acceso), en general estos equipos funcionan emitiendo señales en el mismo espectro de frecuencias que las redes WiFi.

Canales WiFi

Las bandas de 2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz utilizadas en redes WiFi se subdividen en canales para evitar la interferencia y permitir que múltiples redes WiFi coexistan en el mismo espacio físico. Estos canales representan segmentos de frecuencias dentro del espectro de radio asignado y se utilizan para transmitir y recibir datos.

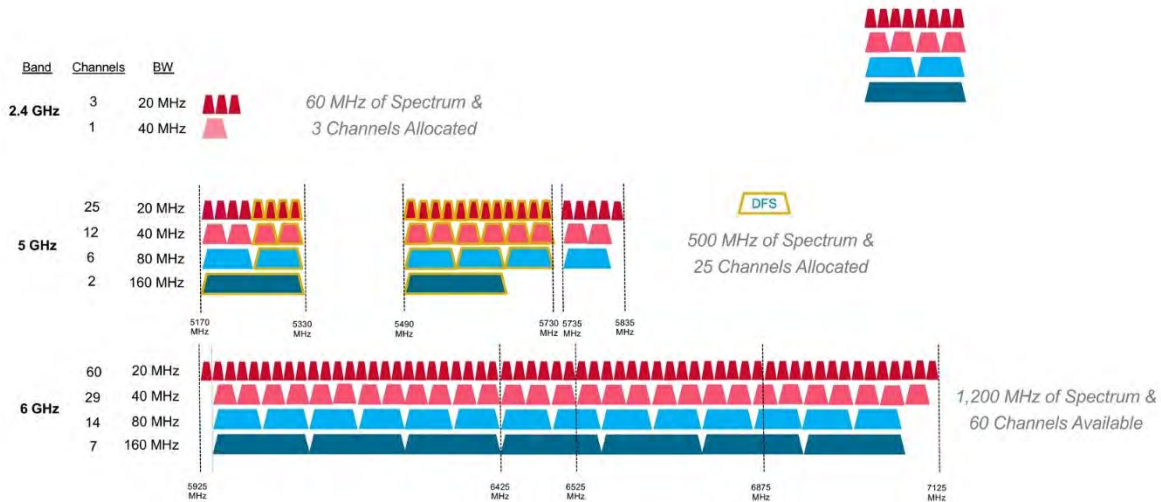


Figura 2.10: Canalización WiFi para las bandas 2.4 GHz, 5GHz y 6GHz. Fuente: Broadcom 2022 (<https://docs.broadcom.com/doc/wi-fi-6e-frequency-bands>).

El incremento en la adopción de redes WiFi debido a su bajo costo y facilidad de instalación ha originado una mayor interferencia entre redes a través de dos fenómenos conocidos como ‘Interferencia de Canal Adyacente’ e ‘Interferencia Cocanal’ [Mhatre et al., 2007]. El primer fenómeno ocurre cuando dos emisores, como los puntos de access, intentan transmitir o recibir datos en canales que se superponen parcialmente entre sí Figura 2.11-a. Para completar las tareas de envío y recepción de datos, los dispositivos deben esperar hasta que el canal se libere, lo que puede causar demoras y afectar el rendimiento de las redes.

El segundo fenómeno, la Interferencia Cocanal, se produce cuando dos o más dispositivos transmiten y reciben datos en el mismo canal de operación Figura 2.11-b. En esta situación, el tiempo de espera se incrementa y generalmente se degrada el rendimiento de las redes, ya que los dispositivos compiten por el acceso al canal, lo que puede llevar a colisiones de datos y retransmisiones.

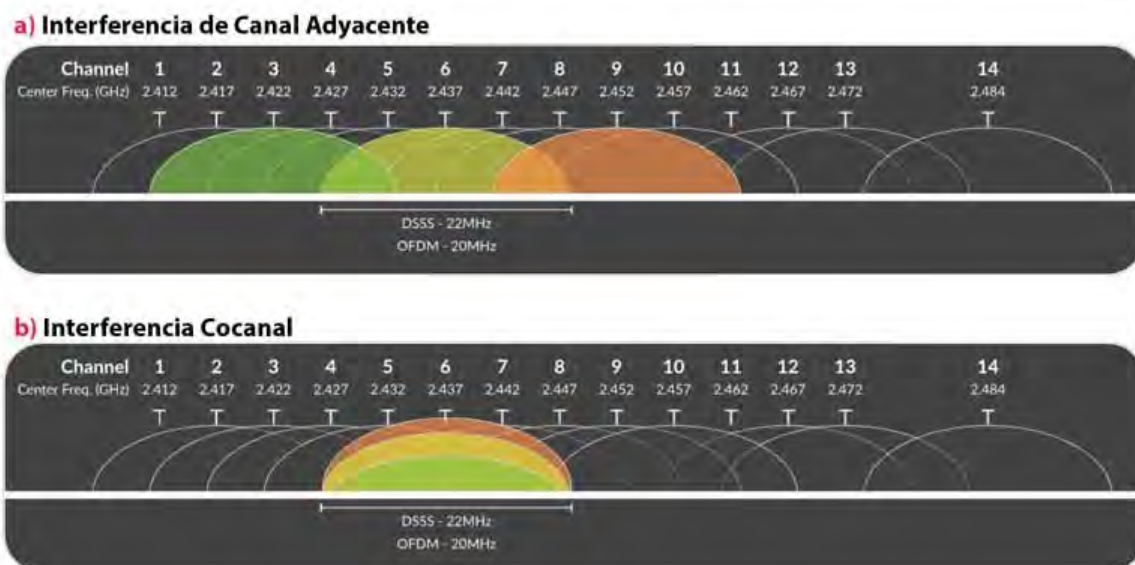


Figura 2.11: Ejemplos de interferencia de canal adyacente y cocanal de la banda 2.4 GHz. Fuente. Adaptación de Ekahau (2022) (<https://www.ekahau.com/blog/channel-planning-best-practices-for-better-wi-fi/>)

2.8.5. Alcances

El alcance de las redes WiFi depende de diversos factores que se producen principalmente en la capa 1 del modelo TCP/IP (Capa de acceso a la red). Entre estos elementos, se destacan: la Potencia de Transmisión, la Frecuencia de Operación, la presencia de Obstáculos y Atenuaciones, las Interferencias, las Características de las Antenas, las Condiciones Atmosféricas, la Potencia de Recepción, la eventual Congestión del Espectro, entre otros.

El alcance de las redes WiFi en entornos interiores ha sido objeto de un estudio exhaustivo por varios autores como [de Carvalho et al., 2012]. No obstante, la presente tesis se enfoca en la aplicación de las redes WiFi en entornos exteriores o rurales, como ocurre en las regiones montañosas de los Andes peruanos. Un ejemplo notable y pionero es el proyecto Digital Gangetic Plains en la India, en el cual se desplegó una red inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.11b de 2.4 GHz, Según informes del estudio [Chebrolu et al., 2006], la implementación y funcionamiento de la red se lograron con hasta 8 nodos interconectados, y el alcance entre estos nodos se registró en un rango de 2 km a 39 km. En esta investigación, se identificaron desafíos en el Protocolo de Acceso al Medio (MAC) y en la resolución de problemas de contención de acceso múltiple con detección de portadora y prevención de colisiones (CSMA/CA) [Raman and Chebrolu, 2007].

En la actualidad, el mercado de la conectividad mediante WiFi, específicamente la producción de hardware, se ha diversificado y actualmente existen soluciones a los problemas que anteriormente habían abordado Chebrolu y Raman. Un equipo que se analiza en el presente estudio, es el caso del radio airMAX Rocket Prism 5AC, fabricado por Ubiquiti, diseñado y adaptado al estándar IEEE 802.11ac 5GHz (Ubiquiti, 2018).

Este dispositivo, combinado con una antena direccional, permite establecer conexiones inalámbricas punto a punto de backhaul a larga distancia, manteniendo un consumo reducido de potencia.



Figura 2.12: Radio Senao 2511CD Plus Ext2 utilizado en el estudio de Chebroly (2006), que permitió un alcance punto a punto de hasta 39 km con velocidades de transferencia de 1-5 Mbps. Por otro lado, el Radio Rocket Prism 5AC, según el informe de Alvarado-Lugo (2018), logró velocidades de aproximadamente 190 Mbps.

2.9. Comunicación Satelital

Los satélites artificiales son unidades mecánicas que orbitan la Tierra a una altitud determinada y están equipados con dispositivos electrónicos dedicados a diversas tareas. El desarrollo de los satélites se aceleró debido al contexto de la Guerra Fría entre Estados Unidos y la Unión Soviética. Como resultado de esta contienda, en 1957, la Unión Soviética puso en órbita terrestre el Sputnik 1, el primer satélite artificial.

Las primeras aplicaciones de los satélites se orientaron con fines militares, sin embargo, estas fueron cambiadas con el tiempo y se aprovecharon en otros aspectos como las comunicaciones y la observación científica. Asimismo, más adelante tendría un mayor crecimiento debido a las diversas aplicaciones comerciales.

2.9.1. Tendencias en la comunicación satelital

Durante la última década, la industria de los servicios de telecomunicaciones por satélite ha atravesado un cambio en su modelo de negocio, expandiendo los servicios tradicionales de cable, telefonía e internet a nichos de mercado más específicos y en

crecimientos, como el seguimiento de contenedores, la comunicación híbrida satelital y hasta la prevención de riesgos. Con la expansión de las tecnologías móviles como 4G y 5G, los operadores satelitales deben reinventar constantemente sus servicios y prestaciones que brindan a los consumidores finales. Un ejemplo es esto son los servicios satelitales orientados a las comunicaciones M2M (Machine to Machine) y IoT Satelital, estos tipos de servicios son la propuesta de los operadores frente a la demanda de comunicaciones y automatización en lugares remotos sin cobertura móvil.

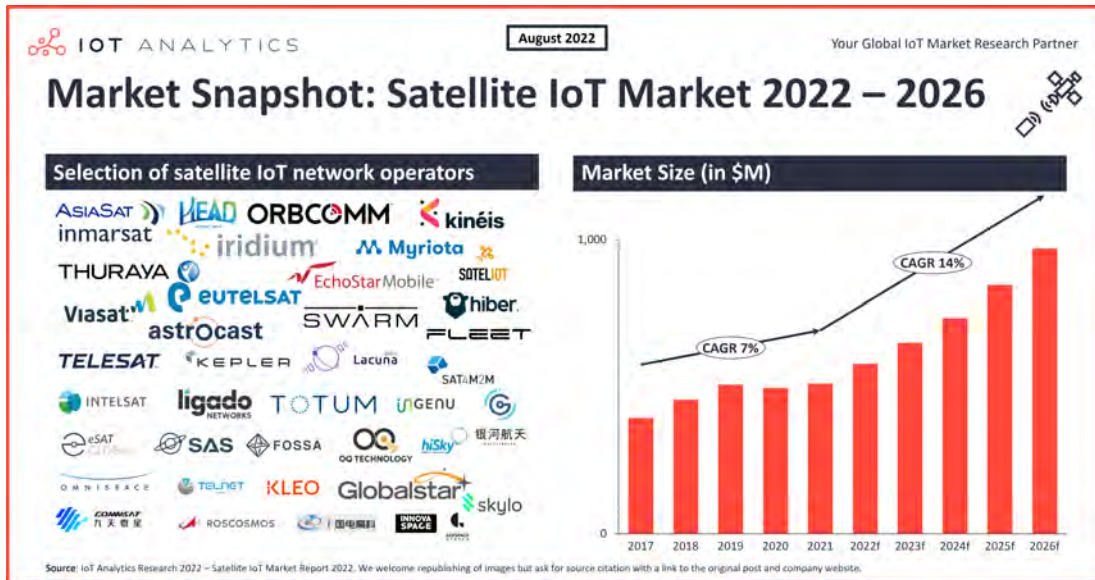


Figura 2.13: De acuerdo al reporte de IoT Analytics, se espera que los ingresos que generen los servicios de IoT Satelital para el 2026 se duplique aumentando Tasa de Crecimiento Anual Compuesto (CAGR), superando los mil millones de dólares. Fuente: IoT Analytics (2022)

2.9.2. Comunicación Maquina a Maquina (M2M)

La comunicación de Maquina a Maquina (M2M) es un término tecnológico que se puede entender como la capacidad de comunicación entre dos dispositivos electrónicos sin una intervención humana explicita; es decir, en este paradigma las maquinas pueden enviar y recibir datos entre sí para luego tomar acciones de mejora sobre las tareas que realizan. No se conoce con exactitud quien acuño el termino M2M por primera vez, pero se le atribuye el crédito a Theodore Paraskevakos, quien patento la forma de enviar datos a través de las primeras líneas telefónicas.

En la actualidad, la tecnología M2M se encuentra presente en muchas tareas habituales, aunque su primera aparición fue en el sector industrial hoy en día también se encuentra en diversas actividades domésticas. Una de las características que más se aprovecha de esta tecnología es el monitoreo remoto. De acuerdo al artículo de [Shea, 2019], la actividad de monitoreo remoto se adapta a casi cualquier tipo de actividad productiva relacionada al uso de equipos tecnológicos. El monitoreo remoto de máquinas se puede entender como la capacidad de obtener datos y conocer el estado actual de una maquina sin la necesidad de un contacto físico directo.

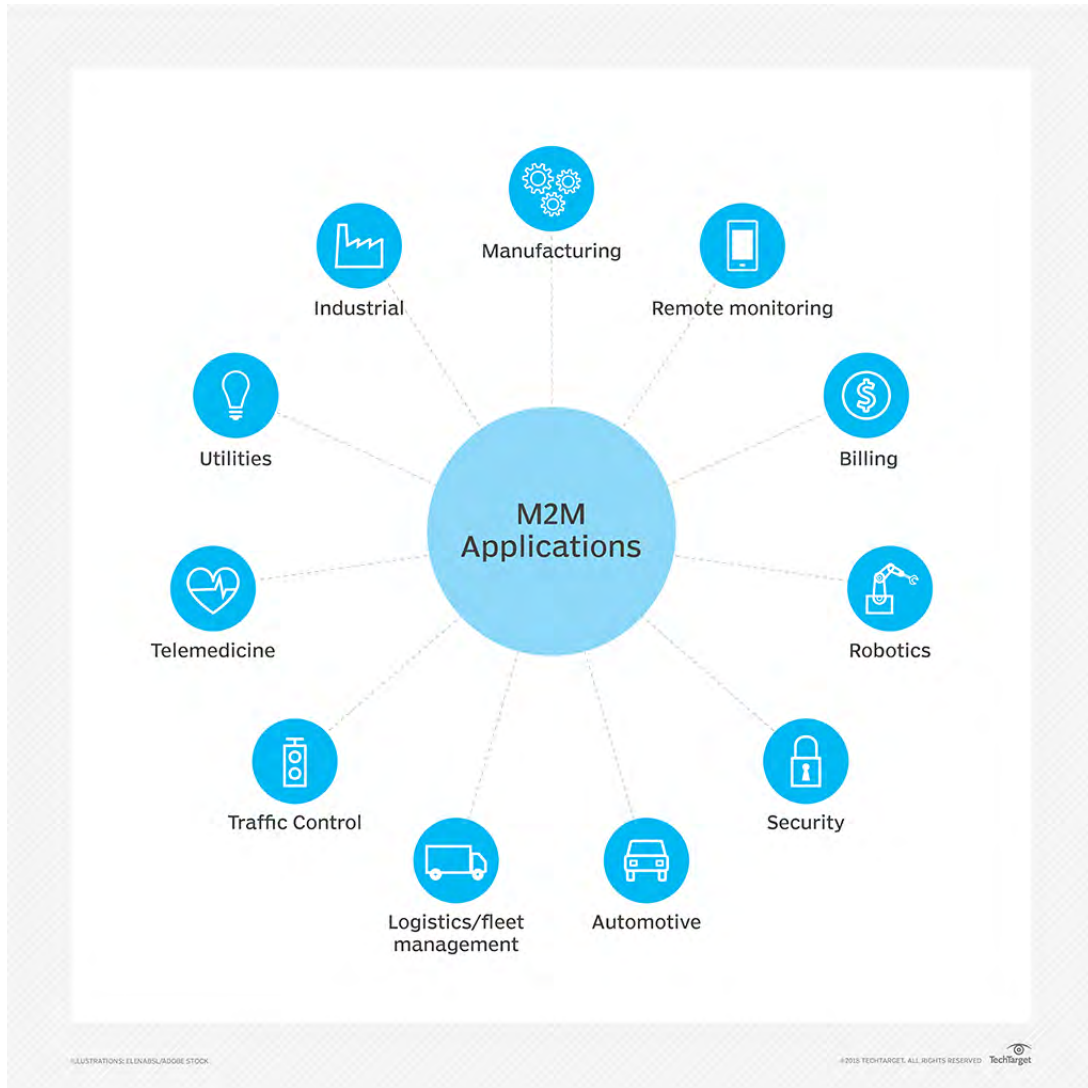


Figura 2.14: Ámbito de aplicación de la tecnología M2M. Fuente: Machine-to-machine (M2M), TechTarget, Shea (2019).

2.9.3. Estado situacional del mercado de bienes y servicios satelitales M2M-IoT

En el mercado de servicios satelitales M2M/IoT se observa diferentes modelos de asociación entre empresas, de las cuales se distinguen la subcontratación y las alianzas comerciales. El abanico diverso de empresas en el mercado satelital se puede organizar en dos categorías principales: En la primera estarían aquellas empresas propietarias de constelaciones satelitales y la segunda las empresas que prestan servicios finales al usuario. Sin embargo, existen casos donde las empresas de la primera categoría también ofrecen servicios al usuario final.

Estado situacional del mercado de bienes y servicios satelitales M2M-IoT

Actualmente, del conjunto total de satélites en órbita; casi el 90 % se encuentran operando en órbitas terrestres bajas o LEO, por sus siglas en inglés. Esto se debe principalmente a las ventajas técnicas que ofrecen como la baja latencia, el bajo consumo energético y los costos accesibles de implementación.

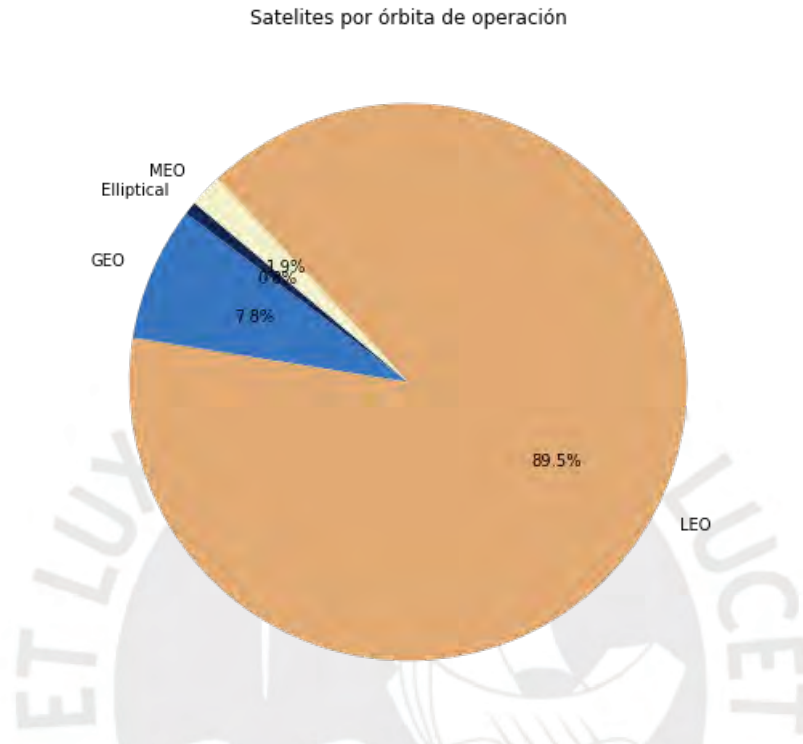


Figura 2.15: Tipos de satélites clasificados de acuerdo a la órbita de operación. Fuente: Análisis de la base de datos: Union of Concerned Scientists USA.

Análisis de las empresas propietarias de constelaciones satelitales

Analizando las primeras 30 empresas con mayor número de satélites, se tiene a SpaceX como el líder con un total de 3996 satélites, seguido por OneWeb con 589 satélites, el resto de empresas cuentan con un número variable entre 10 y 200 aproximadamente. La hegemonía de SpaceX se podría explicar por su ventaja competitiva en el sector de desarrollo tecnológico y lanzamiento de cohetes espaciales, lo cual minimiza su dependencia de terceros para la construcción, lanzamiento y despliegue de sus satélites.

De Tabla 2.2, se muestran 11 empresas que ofertan y proveen el servicio M2M-IoT a través de diferentes modelos de negocios. SpaceX adquirió la empresa Swarm Technologies en 2021, debido a ello comercializan el servicio Swarm IoT. El 8 de enero de 2024, SpaceX anunció las pruebas exitosas de su nuevo servicio Direct to Cell, el cual tiene el objetivo de proveer conectividad LTE a dispositivos celulares, así también se espera que provea servicios IoT para el 2025. OneWeb no provee servicios de M2M-IoT directamente. Su modelo de negocio implica la asociación con otras empresas que ofrecen el servicio final al usuario. En 2023, OneWeb y EutelSat se fusionaron en una única

empresa llamada EutelSat Group, de esta manera se convierte en el primer operador LEO/GEO del mercado.

Iridium Communications presta servicios de conectividad IoT mediante terceros. Un ejemplo de ello, es la asociación con Ground Control, dicha empresa se enfoca en proveer dispositivos y software de conectividad satelital. Iridium comercializa el servicio Short Burst Data (SBD), que en combinación con los dispositivos como el RockBLOCK 9602 hacen posible la comunicación de ráfagas de datos (cientos de bytes). El bajo costo de los dispositivos y los planes accesibles se adaptan a las demandas técnicas y comerciales de los proyectos M2M-IoT.

Orbcomm es otra empresa importante en el sector de servicios M2M-IoT. Esta empresa comercializa transmisores especializados para la comunicación maquina a máquina. Aprovechando su costelación de 35 satélites en la órbita LEO, comercializa el acceso a su red OG2, la cual esta dedicada completamente al IoT. Así mismo, comercializa módems transmisores compatibles con el servicio IsaDataPro de Inmarsat.

Globalstar comercializa módems satelitales para desarrolladores e integradores, es decir ofrece chips integrados y módulos electrónicos que se integran a los sistemas y habilitan una interfaz de comunicación unidireccional de datos y GPS. EutelSat también ofrece un servicio exclusivo para dispositivos IoT. Sin embargo, los terminales satelitales que comercializa presentan grandes dimensiones; esta característica podría restringir las posibilidades de implementación en ciertas aplicaciones M2M-IoT. Por ejemplo, ofrece antenas parabólicas con un radio de entre 60 y 74 cm. Esto se debe a que su constelación de satélites opera en órbitas geostacionarias (GEO).

Gonets Satcom, es una empresa rusa que comercializa terminales y servicio de conectividad satelital M2M-IoT. Una característica destacable de sus terminales en tierra es la interfaz Ethernet 10/100 Base-T, esto representa un cambio de las interfaces seriales tradicionales, lo cual simplifica las tareas de configuración y mantenimiento.

Inmarsat ofrece un conjunto de servicios M2M-IoT denominado Elera IoT, el cual se compone de tres servicios: BeganM2M, IsatData Pro e IoT Connectivity Leasing. El primero es una reorientación de su servicio tradicional de banda ancha a conectividad de banda estrecha. El segundo se enfoca en aplicaciones de seguimiento y monitoreo industrial de alta precisión y disponibilidad, donde se emplean dispositivos modernos y compactos como el ST6200 fabricado por Orbcomm. El tercero se enfoca en empresas que desarrollen hardware y software, y a la vez requieran la red privada de Inmarsat.

Astrocast es una empresa innovadora que comercializa módulos de comunicación satelital, catalogados como Astronode S y Astronode S+, el primero se orienta al público en general, mientras que el segundo al segmento industrial. El modelo de negocio de la empresa se compone de cuatro etapas. La primera etapa consiste en adquirir los módulos satelitales antes mencionados. En la segunda, los clientes deben adquirir y participar en un programa educativo donde se imparten los conceptos técnicos y comerciales. En la tercera etapa los clientes deben desarrollar el diseño y prototipado de la solución buscada. Finalmente, en la cuarta etapa los clientes deben suscribirse al servicio de conexión o plan de datos para el envío de datos a la constelación de satélites.

N.	Operador Propietario	Orbita	Satellites	Servicios IoT/M2M	Fuente
1	SpaceX	LEO	3996	Direct to Cell	Link
2	OneWeb Satellites	LEO	589	A traves de un distribuidor	
3	Planet Labs, Inc.	LEO	220	No	
4	Spire Global Inc.	LEO	135	No	
5	Swarm Technologies	LEO	90	Swarm IoT	Link
6	Iridium Communications, Inc.	LEO	75	A traves de un distribuidor	
7	Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd.	LEO	60	No	
8	SES S.A.	GEO	44	No	
9	Satellogic S.A.	LEO	37	No	
10	ORBCOMM Inc.	LEO	35	Isat Data Pro (GEO) OG2 (LEO)	Link
11	Intelsat S.A.	GEO	35	No	
12	Globalstar	LEO	33	IoT Industrial	Link
13	EUTELSAT S.A.	GEO	29	IoT FIRST	Link
14	European Space Agency (ESA)	MEO	26	No	
15	ICEYE Ltd.	LEO	22	No	
16	Kepler Communications	LEO	21	No	
17	O3b Networks Ltd.	MEO	20	No	
18	HawkEye 360	LEO	18	No	
19	Gonets Satcom	LEO	18	M2M Satellite Channel	Link
20	Guodian Gaoke	LEO	16	IoT Domestico	Link
21	BlackSky Global	LEO	16	No	
22	Kleos Space	LEO	16	No	

Continúa en la siguiente página

Tabla 2.2 continuación de la página anterior

N.	Operador Propietario	Orbita	Satelites	Servicios IoT/M2M	Fuente
23	Russian Satellite Communications Company	GEO	14	No	
24	INMARSAT, Ltd.	GEO	12	Began M2M Elera IoT IoT Connectivity Les- sing IsatDataPro	Link
25	Tyvak Nanosatellite Systems, Inc.	LEO	12	No	
26	Aerospace Corporation	LEO	12	No	
27	Echostar Satellite Services, LLC	GEO	11	No	
28	Telesat Canada Ltd. (BCE, Inc.)	GEO	11	No	
29	Astrocast	LEO	10	Astronode S S+	Link
30	Sky Perfect JSAT Corporation	GEO	10	No	

Tabla 2.2: Primeras 30 empresas del mercado satelital que cuentan con infraestructura propia.

Empresas prestadoras de servicios finales

Las empresas que prestan servicios finales al usuario optan por subcontratar o afiliarse a redes satelitales como Inmarsat, Iridium, OneWeb, entre otras. Para las conexiones M2M-IoT se recomienda el uso de las redes satelitales situadas preferentemente en orbitas bajas como las redes LEO debido a la corta distancia de separación de los satélites con la tierra y consecuentemente la reducción del tiempo de envío y recepción de mensajes.

2.9.4. Aplicaciones de M2M/IoT Satelital

Los proveedores de servicios satelitales M2M-IoT están principalmente alineados con sectores productivos como Transporte, Minería, Recursos Naturales y Gobierno, abarcando una amplia gama de actividades económicas. En la Tabla 2.3 se presenta un conjunto de empresas que cubren las necesidades de comunicación en estos mercados.

n.	Empresa	Descripción	Redes Satelitales
1	Skylo	Es un proveedor internacional que ofrece soluciones de conectividad End-to-End. Cumple el rol de integrador de diferentes tecnologías para problemas específicos.	Emplean Inmarsat, Viasat.
2	Marlink	Ofrece soluciones híbridas que combinan conectividad satelital, terrestre, celular y de radio inalámbrica para la gestión de operaciones M2M inteligentes, además de soluciones de seguimiento y gestión de datos. Los servicios que ofrece se centran en seguimiento de flotas marítimas.	Emplean Inmarsat, O3b mPOWER, OneWeb – Starlink, en las orbitas GEO, MEO y LEO respectivamente.
3	Ground Control	Suministra servicios de conectividad satelital para telecomunicaciones, incluyendo rastreo y mensajería con dispositivos como RockBLOCK y soluciones para la comunicación en áreas remotas a través de la red Iridium Certus y dispositivos como Hughes 9502 para aplicaciones SCADA y M2M	Iridium, Inmarsat y Eutelsat en las orbitas LEO, MEO y GEO respectivamente.

Tabla 2.3: Empresas prestadoras de servicios finales IoT-M2M satelital.

No obstante, también existen aplicaciones enfocadas en el monitoreo de variables ambientales en zonas de alta montaña. Un ejemplo destacado se encuentra en el estudio de [Chen et al., 2022], que describe el desarrollo de un sistema de monitoreo ambiental IoRT (Internet de las Cosas Remotas), habilitado por satélites, para la recolección de datos en áreas remotas del Tíbet. Este sistema utiliza la constelación de satélites Xingyun para transmitir datos de variables como temperatura y humedad, desde estaciones terrestres ubicadas en glaciares y montañas, hasta un centro de datos.

Otra iniciativa relevante es la descrita en el estudio de [Nazir et al., 2017], donde se presenta un sistema de monitoreo remoto basado en satélites diseñado para entornos difíciles y aislados. El sistema WiSE permite la adquisición y transmisión de datos ambientales e imágenes mediante sensores y cámaras conectadas a una red local inalámbrica, utilizando tecnología de comunicación satelital.

Además, proyectos como ICARUS - Very Low Power Satellite-Based IoT destacan en este campo. Este proyecto se centra en el desarrollo de un sistema que utiliza la Estación Espacial Internacional (ISS) para rastrear animales mediante sensores miniaturizados, conocidos como "tags". Estos dispositivos no solo monitorean el comportamiento y la salud de los animales, sino también las condiciones ambientales. Los datos se transmiten a través de un canal satelital de baja potencia, empleando tecnologías de acceso aleatorio y señales de bajo consumo energético, adaptadas a los desafíos propios de la comunicación satelital, como el bajo SNR (relación señal-ruido) y el desplazamiento Doppler [Krondorf et al., 2022].

Capítulo 3

Diseño

En esta sección se desarrolla dos diseños de redes de comunicación. El diseño de la primera red incluye la integración de dos tecnologías: LPWAN y WiFi. La segunda red diseñada es la satelital M2M-IoT, para ello se utilizan los parámetros técnicos del proveedor satelital Orbcomm, modelo ST6100.

3.1. Lugar de estudio

La laguna Arhuaycocha se encuentra ubicada en las coordenadas $8^{\circ}53' S$, $77^{\circ}37' W$, en la región de Ancash de Perú, y es parte de la subcuenca Río Blanco en la cordillera Blanca (Figura 3.1). Debido al crecimiento de la laguna en dirección ascendente hacia el glaciar, su volumen se incrementó hasta $19'550,795 m^3$, con una profundidad máxima de $97.7 m$ y una altura de espejo de agua de $4302 m$ s.n.m., Tiene largo de $1,180 m$ y de ancho $404,5 m$ lineales, según el último levantamiento batimétrico realizado en dicha laguna por la Autoridad Nacional de Agua [Cochachín and Torres, 2011].

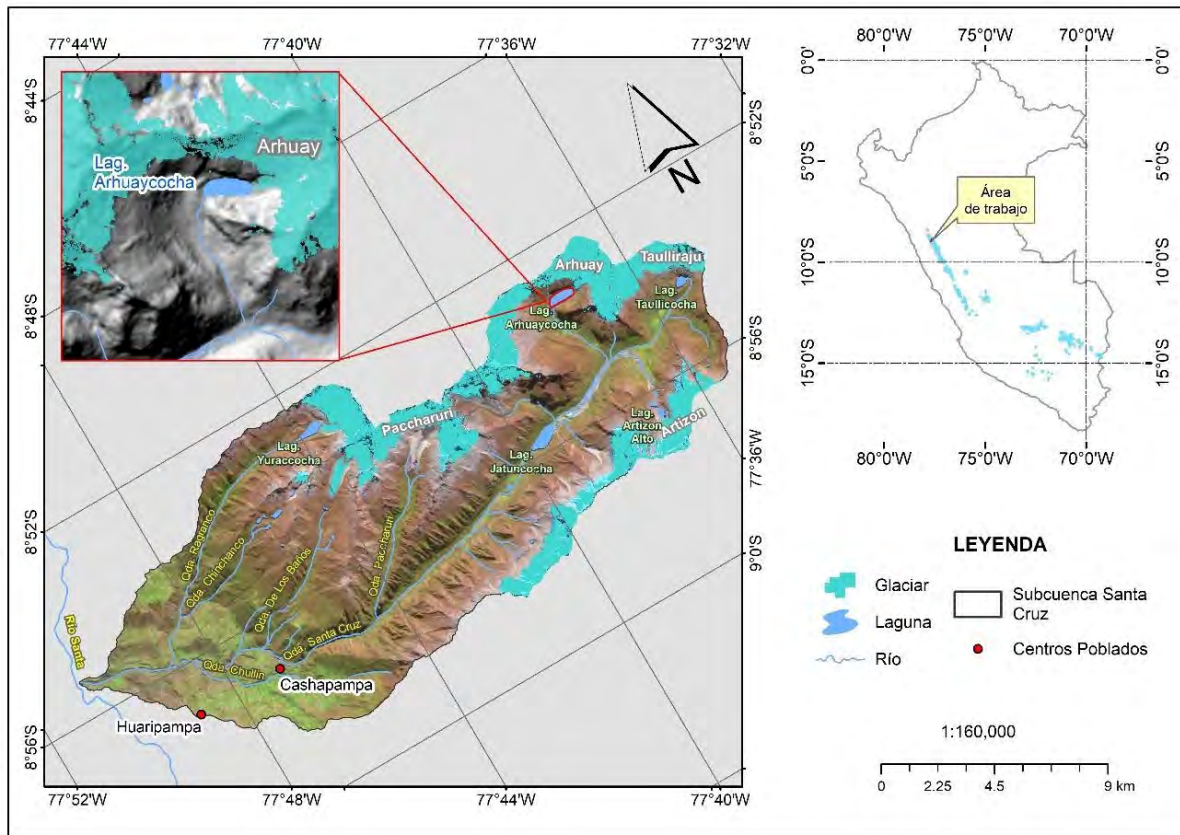


Figura 3.1: Mapa de área de estudio. En rojo se muestra la delimitación de la subcuenca Santa Cruz. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Análisis de accesibilidad geográfica

La zona de estudio se caracteriza por sus montañas empinadas. En la Figura 3.2 se ilustra el análisis de pendientes. Las áreas con pendientes de 40° a 60° están marcadas en rojo, las de 20° a 40° en naranja, y las zonas de menor inclinación, de 0° a 20°, se indican en verde.

Transportar e instalar equipos en montañas implica una logística compleja, especialmente debido a la falta de caminos para vehículos. Generalmente, el transporte se realiza a pie o con animales de carga. Según [Minetti, 1995], las personas prefieren caminar por senderos y colinas con pendientes inferiores a 14°. Por lo tanto, las áreas de menor pendiente (zonas verdes) son ideales para trasladar e instalar equipos de comunicación. No obstante, su fácil acceso puede comprometer la seguridad de estos equipos, haciéndolos vulnerables a robos o vandalismo.

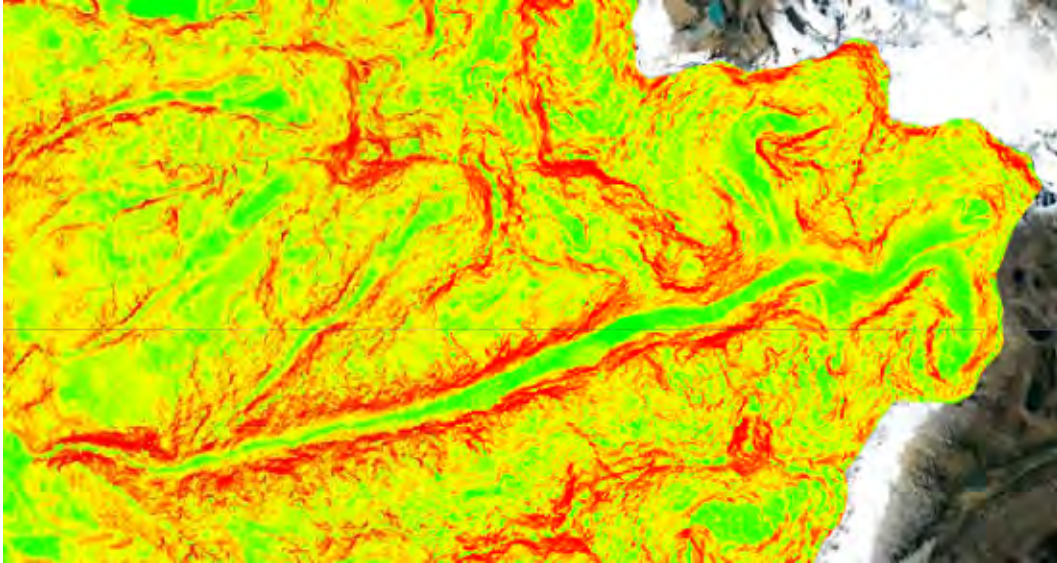


Figura 3.2: Análisis de pendientes de la zona estudiada, en verde se muestran las zonas con pendientes en el rango de 0° a 20°, en naranja de 20° a 40°, y en rojo de 40° a 60°. Fuente: Elaboración propia empleando el software Google Earth Engine.

3.3. Análisis de vegetación en la zona

Para analizar la vegetación en la zona se utilizó un el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). El NDVI es un indicador que resume el estado y la densidad de la vegetación para áreas extensas y se calcula a partir de las medidas de reflectancia en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano (NIR) de la luz solar.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Donde *NIR* es la reflectancia en el infrarrojo cercano y *RED* es la reflectancia en el rojo visible.

Para el análisis se utilizó imágenes satelitales Sentinel-2 debido a que cuentan con 13 bandas espectrales incluidas el NIR y el RED. Los resultados se presentan en la siguiente figura, las áreas de color verde más oscuro representan una densidad de vegetación más alta, mientras que las áreas azules y moradas representan agua o baja reflectancia en las bandas roja y NIR, y los colores claros indican áreas de menor densidad vegetal o posiblemente terreno desnudo.

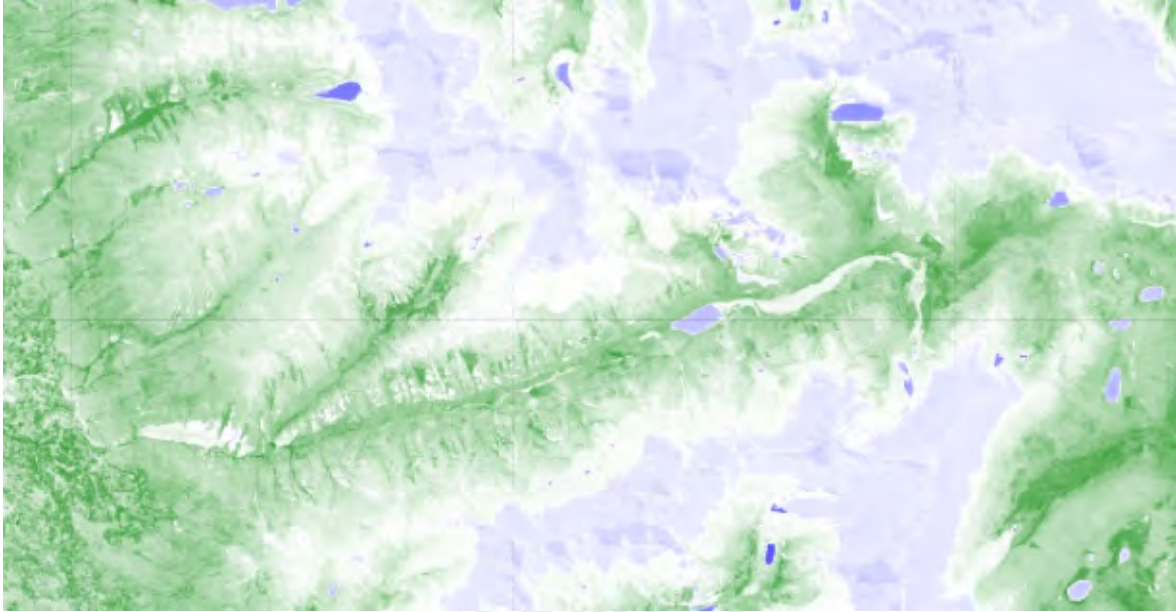


Figura 3.3: Índices de vegetación en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Para reducir la probabilidad de atenuación de señales por efectos de la vegetación, se tomó en cuenta el área con menor densidad de vegetación (zonas claras de la Figura 3.3) como las zonas potenciales para la instalación de sensores y equipos de comunicación.

3.4. Sensores de medición de variables ambientales

Los sensores son dispositivos que transforman las magnitudes físico-químicas en magnitudes eléctricas. Estos dispositivos, tienen la capacidad de transformar las variables físicas del ambiente en señales eléctricas de corriente o voltaje. Las señales son registradas por un dispositivo maestro que transforma las lecturas analógicas a digitales.

Entre las variables ambientales identificadas en el caso de estudio se tiene la medición de magnitudes físicas como el nivel del espejo de agua y el deslizamiento de masas glaciares. También se consideran variables meteorológicas como la temperatura, la humedad, la radiación UV, la dirección/velocidad del viento, la presión atmosférica y la cantidad de precipitación.

3.4.1. Sensor del nivel de espejo de agua

En los entornos montañosos, se encuentran diversas fuentes de agua y cada una de ellas tiene un nivel de espejo de agua, este estudio se centra principalmente en dos de ellas: por un lado, los niveles de agua de las lagunas glaciares; por otro, los niveles de los ríos y cauces naturales. La medición de los cambios en los niveles de espejo de agua es importante para múltiples áreas de investigación e ingeniería. Entre las aplicaciones más relevantes se incluyen la regulación del recurso hídrico, el estudio del deshielo glaciar, la evaluación del impacto ambiental, el desarrollo de proyectos agrícolas y, para el caso de estudio, la prevención de riesgos asociados a desastres naturales.

Existen diversos tipos sensores capaces de medir los niveles de espejo de agua, en el presente estudio se toman en los siguientes:

Sensor Radar	Sensor de presión
<p>Este tipo de sensor funciona sin contacto con el agua. El principio de funcionamiento se basa en la reflexión de ondas de una señal electromagnética sobre la superficie del agua. Se calcula el tiempo de recorrido de la señal y la altura del nivel de espejo de agua.</p>	<p>El sensor se instala a una profundidad conocida. El principio de funcionamiento se rige por la presión hidrostática que experimenta el sensor en un líquido en reposo (agua). Existe una relación lineal entre la presión y la altura del agua, es decir a mayor presión mayor altura del agua y viceversa.</p>

Tabla 3.1: Tipos de sensores de nivel de espejo de agua empleados en el estudio.

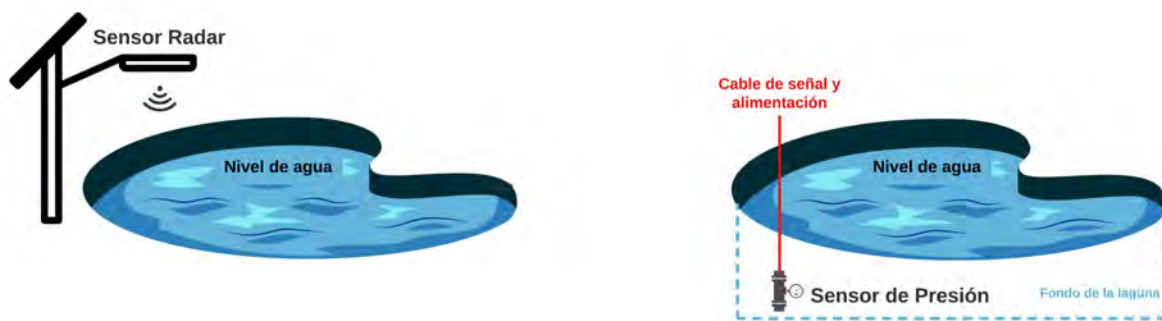


Figura 3.4: Representación visual del funcionamiento de los sensores de nivel de agua de tipos radar y presión. Fuente: Elaboración propia.

Característica	Sensor de Radar	Sensor de Presión
Rango de medición	0.4 – 35 m	Escalas de medición (EM) 0 - 4 m 0 - 10 m 0 - 20 m 0 - 40 m
Exactitud	0,8 - 2 m: ± 10 mm 2 - 30 m: ± 3 mm 30 - 35 m: ± 10 mm	FS ± 0.5 % EM (SDI-12) ± 0.01 % EM (4-20 mA)
Tiempo de medición	20 segundos	2 segundos
Interfaces de comunicación	SDI-12 RS-485	4 - 20 mA, SDI-12, RS485 (vía protocolo SDI-12)
Tensión de alimentación	12/24 V	Desde 9.6 hasta 28 V
Potencia de consumo (a 12V)	En modo servicio: <15 mA En modo descanso: <0.05 mA	En modo servicio: <3,6 mA En modo descanso: <400 μ A
Condiciones de operación	-40°C hasta 60°C	-25°C hasta 70°C
Tipo de protección	IP67 (profundidad de inmersión máx. 1 m; duración de inmersión máx. 48 h)	IP68
Referencia	OTT RLS	OTT PLS

Tabla 3.2: Especificaciones Técnicas de los sensores de nivel de espejo de agua de tipo radar y presión.

3.4.2. Sensor de deslizamiento de masa glaciar

Las masas glaciares se originan principalmente por la acumulación de la nieve. Los glaciares son masas dinámicas que cambian en el tiempo, es decir crecen o decrecen, se mueven y también cambian de forma. Si existen condiciones climatológicas frías los glaciares acumulan una gran cantidad de nieve, cuando la nieve se compacta en una zona estable se produce un crecimiento en el glaciar. Sin embargo, si la acumulación de nieve se produce en una zona inestable o con una pendiente pronunciada, existe la probabilidad de que se produzca un deslizamiento de masa glaciar, a este fenómeno también se le conoce como avalancha.

El objetivo del sensor es medir la deformación de la superficie glaciar, generalmente ocasionado por una avalancha. En la industria, existen diversos métodos y equipos tecnológicos dedicados a medir la deformación de un terreno que se pueden adaptar a un glaciar. Un método común y accesible es mediante la instalación de estaciones GPS de alta precisión. Otro método es mediante el uso de Radares de Apertura Sintética (SAR), estos equipos están diseñados para medir los cambios milimétricos en los terrenos, típicamente se emplean en yacimiento mineros. También existen métodos de análisis visual como la fotogrametría. Sin embargo, en este estudio ninguno de los métodos mencionados se toma en cuenta considerando que, los GPS de alta precisión y los SAR implican una alta inversión económica. Las mediciones del terreno mediante análisis de fotogrametría, no se adaptan a un monitoreo automático porque requieren de un operador en todo momento.

Sensor de cuerda vibrante

Se propone el uso de un sensor de cuerda vibrante, este sensor funciona bajo el principio de que la tensión en un cable vibrante cambia cuando se altera la distancia entre sus puntos de anclaje, lo cual puede ser causado por movimientos de masas, cambios estructurales de un cuerpo, fisuras o dilataciones en el terreno, etc.

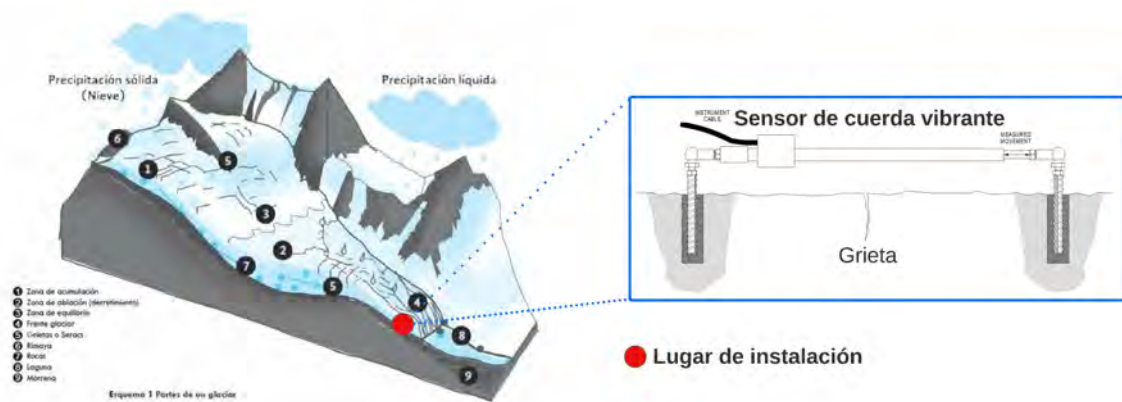


Figura 3.5: Ubicación preferente de un sensor de cuerda vibrante sobre el frente glaciar. Fuente: Adaptación de la figura de [Quintero Londoño, 2020].

Sensor de cuerda vibrante		Data Logger and Gateway	
Resolución	0.01 mm	Consumo	20mW
Rango de medición	Escalas de medición (EM) 50, 75, 100, 150, 300 (mm)	Protocolo de comunicación	IEEE 802.15.4 (Para comunicaciones con los sensores)
Exactitud	<= +/-0.10 % de EM		
Configuración de muestreo	10 y 15 muestras/segundo	Sensibilidad del receptor	-101 dBm (Para comunicaciones con los sensores)
Intervalo de transmisión de datos	18-360 segundos	Ganancia de antena	3 dBi
Protocolo de comunicación	IEEE 802.15.4	Tipo de protección	IP65
Distancia de comunicación	1km, Sin obstrucciones	Capacidad de sensores	250 (SenSpot sensors)
Condiciones de operación	-40°C hasta 65°C	Comunicación con Internet	Ethernet IP
Tipo de protección	IP67	Equipo de referencia	SeniMax Data Logger and Gateway
Alimentación	Batería reemplazable de Litio-ion		
Equipo de referencia	Displacement Meter SenSpot, Fabricante: Resensys.		
Costo	S/6,000		

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas de un sensor comercial de cuerda vibrante junto con el datalogger y gateway compatible.

3.4.3. Sensores meteorológicos

La meteorología es la ciencia que nos permite entender el comportamiento de variables atmosféricas como la temperatura, la humedad, la radiación solar, entre otras. Estas variables son importantes para monitorear y comprender los cambios en los glaciares y lagunas. El registro detallado de estas variables meteorológicas ayuda a evaluar el crecimiento o la reducción de los glaciares. Además, estas mediciones son útiles para determinar los niveles de riesgo asociados a las lagunas. Por ejemplo, un aumento en las temperaturas diurnas puede ser un indicador de una mayor fusión glaciaria, lo que incrementa la inestabilidad en las estructuras glaciares. Esta condición eleva la probabilidad de avalanchas y posibles desbordes de lagunas, representando un riesgo que debe ser monitoreado.

A diferencia de los sensores de deslizamiento de masas glaciaria, en la industria existe una gran variedad de sensores, dataloggers y mecanismos de telemetría exclusivamente para entornos de montaña. Para el caso de estudio, se tomó en cuenta una estación meteorológica de grado científico de la marca *Campbell Scientific*.

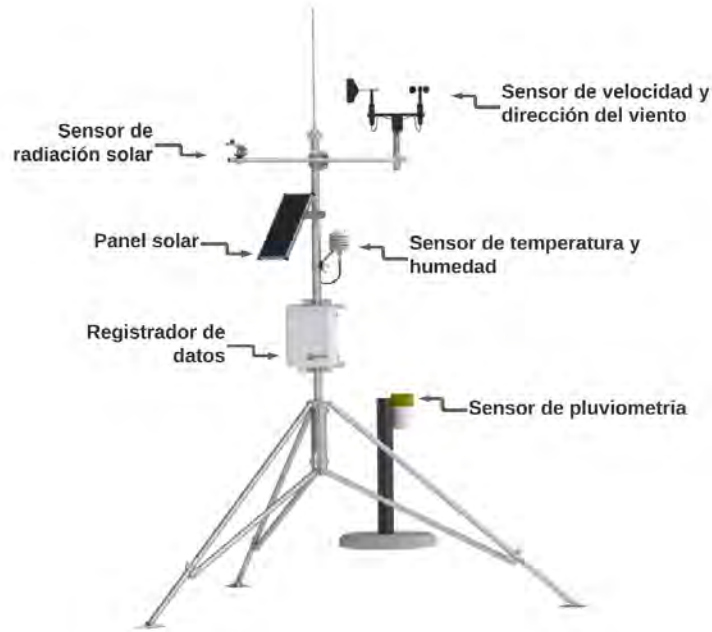


Figura 3.6: Estación meteorológica de alta montaña. Marca Campbell Scientific.

Una estación meteorológica convencional se divide en dos módulos principales. El primer módulo es el registrador de datos o datalogger, funciona como Unidad Central de Procesos (CPU) donde su principal función es leer y registrar las señales analógicas y digitales de los sensores. El datalogger CR1000X, de la marca *Campbell Scientific*, también cuenta con diferentes puertos y protocolos de comunicación que se adaptan a la integración con transmisores Satelitales y IoT. Una solución viable es la conexión del datalogger y un transmisor mediante el puerto serial RS232 o RS485, y través del protocolo Modbus es posible establecer una comunicación con la arquitectura maestro-esclavo.

El segundo modulo está constituido por el conjunto de sensores que registran las variables meteorológicas. En general, los sensores requieren una cantidad mínima de corriente y solo existe un consumo elevado cuando se congelan y requieren activar el modo de calentamiento. Dependiendo del tipo de sensor, estos producen señales analógicas o digitales, en el caso de las señales analógicas están pueden ser corrientes o voltaje. En el caso de los sensores digitales, el sensor transforma internamente las señales analógicas y produce una señal digital que es registrada por el *datalogger*. Al poseer un mecanismo electrónico incorporado para transformar las señales analógicas a digitales, los sensores digitales tienen un costo superior en comparación con los sensores analógicos.

3.5. Estimación del peso digital de los datos

Si denominamos *mensajes* a los paquetes de información que envían los sensores ambientales, tenemos que estos mensajes se dividen en dos secciones principales: *Carga útil* y *Cabecera*, los cuales se detallan a continuación:

3.5.1. Carga útil (Payload)

La carga útil o *payload* es la parte del mensaje que contiene los datos efectivos que transmitirán los sensores. Estos datos son la representación digital de los valores que registran como el nivel de agua, temperatura, humedad, entre otros.

Los sensores pueden registrar valores a intervalos de tiempo configurables. Para el caso de estudio, la frecuencia de medición establecida es de un minuto, es decir cada sensor registra un valor cada minuto. Los sensores de nivel de espejo de agua y de deslizamiento de masas registran valores únicos, es decir, solo reportan un valor específico a la vez. En cambio, el sensor meteorológico registra varios valores simultáneamente. Para cada valor se estimó el peso digital en *bytes*. Con la estructura de datos, en formato JSON, que se muestra en la Figura 3.7, se obtiene un tamaño digital promedio de 75 *bytes*, incluyendo la fecha (*datetime*), el valor medido (*value*) y el identificador del sensor (*sensor*).

```
{
  "datetime": "YYYY-MM-DD HH:MI:SS",
  "value": valor_registrado,           (ejemplo: 10.0)
  "sensor": "codigo_sensor"          (ejemplo: SNEA1 | SDM1 | SM )
}
```

Figura 3.7: Estructura de mensajes utilizada para los sensores.

Sensores Ambientales	Valor registrado	Rango de medición	Resolución	Peso máximo del payload (bytes)	Frecuencia de medición (minutos)
Sensor del nivel de espejo de agua	Nivel de agua	0 m - 10 m	0.1	74	1
Sensor de deslizamiento de masa glaciár	Vibración en rocas	0 mm - 50 mm	0.01	75	1
Sensores meteorológicos	Temperatura	-50 - 84 (°C)	0.1	75	1
	Precipitación	0 m - 500 mm	0.1	75	1
	Humedad	0% - 100%	0.1	75	1
	Radiación	0 - 2000 Wm ²	0.01	78	1
	Dirección del viento	0 - 360 (°)	0.1	75	1
	Velocidad del viento	0 - 100 (km/h)	0.1	75	1

Tabla 3.4: Estimación del peso digital en bytes que generan los sensores ambientales a una frecuencia de medición de un minuto. La columna "peso máximo del payload" se determinó reemplazando el valor registrado (*value*) con los valores máximos del rango de medición de cada sensor.

3.5.2. Cabecera (Header)

La cabecera es el complemento del *payload* que contiene información de señalización y control, sirve para la verificación de la transmisión y recepción de los mensajes en el *gateway* (LPWAN o M2M-IoT Satelital). La cabecera incluye datos como la dirección del destinatario, la longitud del mensaje, información de enrutamiento, códigos de verificación de errores (CRC), y otros parámetros de control.

Cabecera por tipo de Gateway	Tamaño típico de la cabecera
LoRa	13 bytes
M2M-IoT Satelital	2 bytes

Tabla 3.5: Tamaño típico de la cabecera para diferentes tecnologías. La estimación del peso de la cabecera para la tecnología M2M-IoT Satelital se obtuvo utilizando la herramienta Messenger ORBCOMM.

3.5.3. Peso digital absoluto

En el estudio se considera **peso digital absoluto** a la suma de los bytes del *payload* y el *header*. Como el header varía dependiendo de la tecnología utilizada, se calculó el peso digital absoluto LPWAN (LoRa) y M2M-IoT Satelital. El procedimiento involucró la suma de los valores del *payload* en la Tabla 3.4 junto con el valor típico de la cabecera para las tecnologías LoRa y M2M-IoT Satelital (ver Tabla 3.5). Se utilizaron los valores de la tabla anterior, es decir 13 y 2 bytes.

Valor Registrado	Payload (P) (bytes)	Payload Header (H) (Bytes)		Peso Digital Absoluto (P + H)	
		LoRa	M2M-IoT Satelital	LoRa	M2M-IoT Satelital
Nivel de agua	74	13	2	87	76
Vibracion en rocas	75			88	77
Temperatura	75			88	77
Precipitación	75			88	77
Humedad	75			88	77
Radiacion	78			91	80
Direccion del viento	75			88	77
Velocidad del viento	75			88	77

Tabla 3.6: Peso digital absoluto de los datos generados por los sensores ambientales.

3.5.4. Demanda de la velocidad de transmisión de datos

La velocidad de transmisión de datos es una medida de la cantidad de datos que se pueden transmitir a través de un canal de comunicación en un periodo de tiempo determinado. La velocidad de transmisión de datos se expresa de diversas maneras como: bits por segundo (bps) o kilobits por segundo (kbps). Idealmente se espera que cada sensor ambiental transmita datos en el menor tiempo posible.

Para calcular la velocidad de transmisión de datos, se convirtió el Peso Digital Absoluto (P+H) a bits. Esta conversión se realizó multiplicando cada valor por un factor de 8, correspondiente al número de bits contenidos en un byte. Los resultados se presentan en la Tabla 3.7. La columna “[P+H] (Bits)” muestra la cantidad total de datos que se transmitirían por cada valor registrado.

Se observa que los mensajes transmitidos mediante la red LoRa son ligeramente mayores que los de la red satelital, debido a que LoRa utiliza una cabecera más extensa (13 bytes), en comparación con la de su contraparte satelital (2 bytes). Cabe señalar que el tamaño del payload es el mismo para ambas tecnologías.

Valor registrado	P + H (Bytes)		P + H (Bits)	
	LoRa	M2M-IoT Satelital	LoRa	M2M-IoT Satelital
Nivel de agua	87*8	76*8	696	608
Vibración en rocas	88*8	77*8	704	616
Temperatura	88*8	77*8	704	616
Precipitación	88*8	77*8	704	616
Humedad	88*8	77*8	704	616
Radiación	91*8	80*8	728	640
Dirección del viento	88*8	77*8	704	616
Velocidad del viento	88*8	77*8	704	616

Tabla 3.7: Conversión del peso digital de Bytes a Bits por tipo de valor registrado.

En la Tabla 3.8 se presenta la demanda promedio de velocidad por tipo de red, expresada en bits por segundo (bps) y kilobits por segundo (kbps). Esta demanda fue calculada mediante un promedio simple por tipo de sensor.

Se observa que la tecnología LPWAN LoRa requiere una mayor velocidad de transmisión en comparación con la red M2M-IoT Satelital. Los valores obtenidos —0.7 kbps para LPWAN y 0.61 kbps para M2M-IoT Satelital— se establecen como las velocidades mínimas que ambas redes deben ser capaces de soportar.

Tipo Red	P + H por tipo de sensor (Bits)			Demanda de Velocidad Promedio	
	SNEA	SDM	SM	bps	kbps
LoRa	696	704	708	702.6	0.70
M2M-IoT Satelital	608	616	620	614.6	0.61

Tabla 3.8: Demanda de velocidad de transmisión de datos para los sensores por tipo de red.

3.6. Consideraciones técnicas para la ubicación de los sensores ambientales

Para determinar la ubicación de los sensores se propone un conjunto de criterios con el objetivo de asegurar una medición continua y de calidad.

3.6.1. Criterios de espaciales

Criterio de representatividad

Una medición representativa se pueda entender como la medición de un punto específico que se asemeja y es homogénea a las mediciones de un área mayor, es decir es una muestra que representa adecuadamente la población.

Criterio de seguridad

Este criterio se establece para asegurar la integridad de los sensores ambientales. Como principio básico, se debe tener en cuenta que cada sensor debe estar alejado de peligros naturales como avalanchas o inundaciones repentinas.

Criterio de redundancia

La redundancia es el mecanismo que asegura el funcionamiento continuo frente a la ocurrencia de un error inesperado que afecte el sistema. Es decir, si un sensor presenta un error inesperado que interrumpa su funcionamiento, se debe contar un sensor secundario que restablezca el proceso de medición.

3.6.2. Consideraciones para los Sensores de Nivel de Espejo de Agua (SNEA)

En la medición del espejo de agua de lagunas, se intuye que las mediciones realizadas en el perímetro reflejan fielmente el nivel en toda la laguna debido a la tendencia natural del líquido a distribuirse de manera uniforme sobre la superficie. Esta uniformidad se atribuye a la propiedad intrínseca del agua de buscar un equilibrio bajo la influencia de la gravedad, complementada por la forma geométrica generalmente convexa del fondo de las lagunas, lo que favorece un nivel constante del agua.

En base al párrafo anterior, el punto de medición del nivel del espejo de agua puede ser cualquier punto que se encuentre al borde de la laguna, cumpliendo el criterio de representatividad.

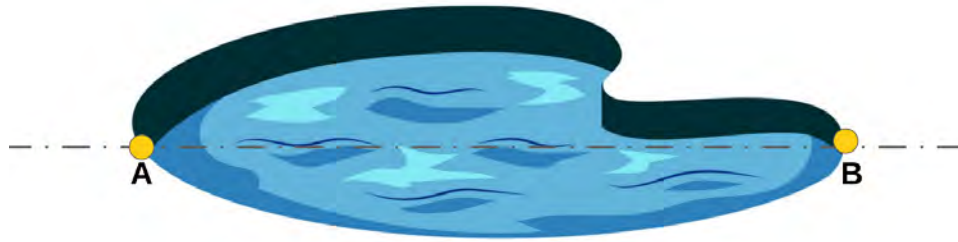


Figura 3.8: El punto de medición del nivel de espejo de agua en el punto A es el mismo que en el punto B debido a las propiedades hidrostáticas del agua y principalmente a la distribución homogénea del líquido sobre un plano horizontal.

Considerando la seguridad, la ubicación de los sensores debe evadir zonas propensas a deslizamientos de rocas o nieve para proteger su integridad y asegurar la continuidad de las mediciones. Por lo tanto, se considera que una ubicación favorable se encuentra en la parte más alejada de la zona de deslizamiento de masas.

Como medida de redundancia, los puntos de medición tanto en la zona media como en la zona frontal deben contar con un sensor alternativo que asegure la continuidad de la medición en caso de que algún sensor deje de funcionar.

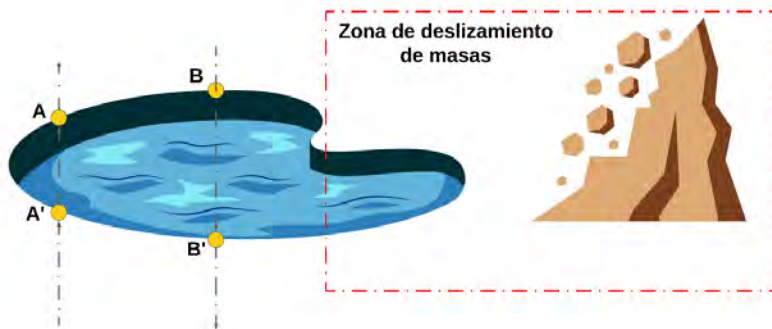


Figura 3.9: Los puntos A y B se encuentran ubicados en la zona media y frontal de la laguna, asimismo se encuentran alejados de la zona de deslizamiento de masas. Los puntos A' y B' son puntos de redundancia de A y B.

3.6.3. Consideraciones para los Sensores de Deslizamiento de Masas (SDM)

Para registrar el deslizamiento de masas glaciares se propone un sensor de cuerda vibrante diseñado específicamente para detectar los cambios superficiales de un terreno. El sensor se debe ubicar en una zona estable, cerca al lugar donde se producen los deslizamientos de nieve y roca. Las medidas de seguridad para asegurar la integridad del sensor son mínimas considerando que no existe un conocimiento pleno sobre la estabilidad del terreno y la magnitud de los deslizamientos. Sin embargo, se propone las zonas de roca situados al frente del glaciar como las más convenientes por su estabilidad.



Figura 3.10: Los puntos A y B representan la ubicación del sensor de cuerda vibrante, los cuales se encuentran próximos a la zona de deslizamiento de masas.

3.6.4. Consideraciones para los Sensores Meteorológicos (SM)

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), es la entidad que regula las prácticas para la instalación y operaciones de estaciones meteorológicas. En Perú, las entidades competentes son el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) que elaboran lineamientos para la instalación y operaciones de estaciones meteorológicas. A continuación, se muestra un resumen de criterios para la instalación de dichas estaciones.

Altitud

La estación debe ubicarse a una altitud que sea representativa de la región de interés.

Exposición

La ubicación debe tener una exposición representativa, evitando lugares que estén protegidos o expuestos a condiciones extremas debido a la topografía local.

Evitar Obstrucciones

La estación debe estar lejos de obstrucciones altas como árboles, edificios o montañas que puedan alterar los patrones de viento, la radiación solar o las precipitaciones.

Accesibilidad

Es importante considerar la accesibilidad para el mantenimiento regular y la recopilación de datos.

Topografía Local

Se debe tener en cuenta la topografía local para evitar efectos de canalización del viento o acumulación de aire frío en depresiones

Distancia de Masas de Agua

La proximidad a grandes cuerpos de agua puede influir en la temperatura y la humedad, por lo que debe considerarse la distancia a estos.

Impacto Ambiental

Minimizar el impacto ambiental de la instalación de la estación.

En el estudio de caso, se tienen en cuenta todos los criterios mencionados previamente, con especial énfasis en el criterio de Distancia a Cuerpos de Agua. Según este criterio, se establece que la estación meteorológica debe ubicarse a una distancia mínima de 500 metros de la laguna [Yerrén-Suárez, 2021], ya que la proximidad podría afectar las mediciones de temperatura y humedad.



Figura 3.11: En el punto A representa la estación meteorológica, la cual se encuentra alejada de la laguna y a un nivel altitudinal cercano a la laguna y el glaciar.

3.6.5. Elección de la Ubicación de los Sensores Ambientales

Teniendo en cuenta los criterios de ubicación y las consideraciones de cada sensor, se definió los puntos geográficos de ubicación para el Sensor de Nivel de Espejo de Agua (SNEA), Sensor de Deslizamiento de Masas (SDM) y los Sensores Meteorológicos (SM). Los SNEA se encuentran ubicados en el margen de la zona media y frontal de la laguna, mientras que SDM se encuentran en los yacimientos rocosos, cerca de la zona de deslizamiento de masas. Los SM se encuentran ubicados a una distancia aproximada de 1 km en línea recta de la laguna Arhuaycocha.



Figura 3.12: Ubicación de los sensores ambientales. Sensor de Nivel de Espejo de Agua (SNEA), Sensor de Deslizamiento de Masas (SDM) y los Sensores Meteorológicos (SM).

Sensor	Código	Latitud	Longitud
Sensor de Nivel de Espejo de Agua	SNEA 1	-8.886133	-77.626968
	SNEA 2	-8.889712	-77.627342
	SNEA 3	-8.886331	-77.632079
	SNEA 4	-8.889610	-77.630624
Sensor de Deslizamiento de Masas	SDM 1	-8.885185	-77.621943
	SDM 2	-8.889281	-77.618488
Sensores Meteorológicos	SM	-8.891580	-77.626253

Tabla 3.9: Ubicación geográfica de los sensores ambientales.

3.7. Diseño de la red WIFI-LPWAN

3.7.1. Topología de la red WIFI-LPWAN

La topología de red WIFI-LPWAN es una combinación entre de línea y estrella. El segmento de red WIFI se compone de un conjunto de nodos microondas, en la Figura 3.13, se presenta una conexión simplificada entre la base y un nodo de repetición. El Proveedor de Servicios de Internet (ISP), se conecta a la Base Microondas con la finalidad de habilitar el servicio de internet, posteriormente se establece una conexión en línea entre la base y los nodos microondas. En el segmento de red LPWAN, se cuenta con una Gateway que funciona como una puerta de enlace inalámbrica para los sensores ambientales (SNEA, SDM, SM). El gateway se conecta a internet a través del nodo final microondas.

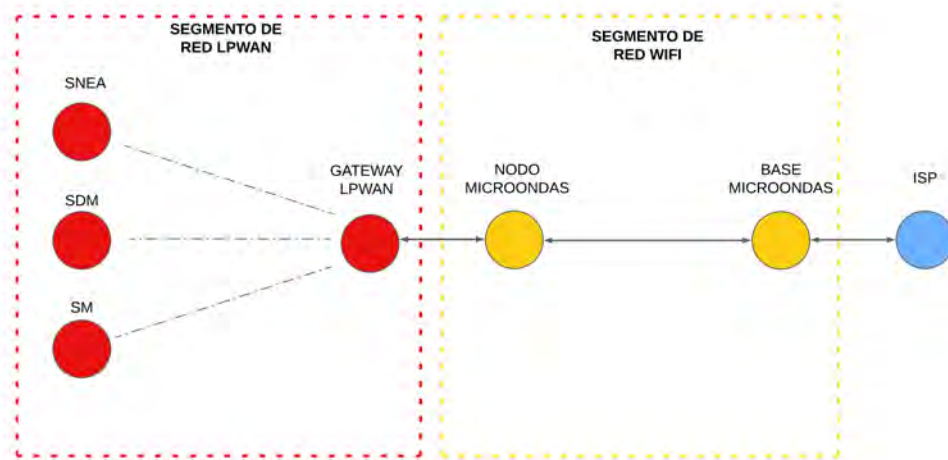


Figura 3.13: Topología de la red WIFI-LPWAN, dicha red se compone de dos segmentos principales: El primero es la red Wifi y el segundo es la red LPWAN. La red Wifi cumple la función de la red de transporte mientras que la red LPWAN cumple las funciones de la red de acceso.

3.7.2. Ubicación del Gateway LPWAN

El funcionamiento del segmento LPWAN depende principalmente de la ubicación del gateway de acceso inalámbrico, por ende, está ubicado en una posición estratégica desde la cual proporcione cobertura de comunicación inalámbrica a todos los sensores ambientales (ver Tabla 3.9), además se encuentra alejada del área de inundaciones (área roja de la Figura 3.14), asimismo su ubicación facilita tareas de instalación y

mantenimiento. Los Sensores Meteorológicos (SM) comparten ubicación con el gateway (GW_LPWAN).

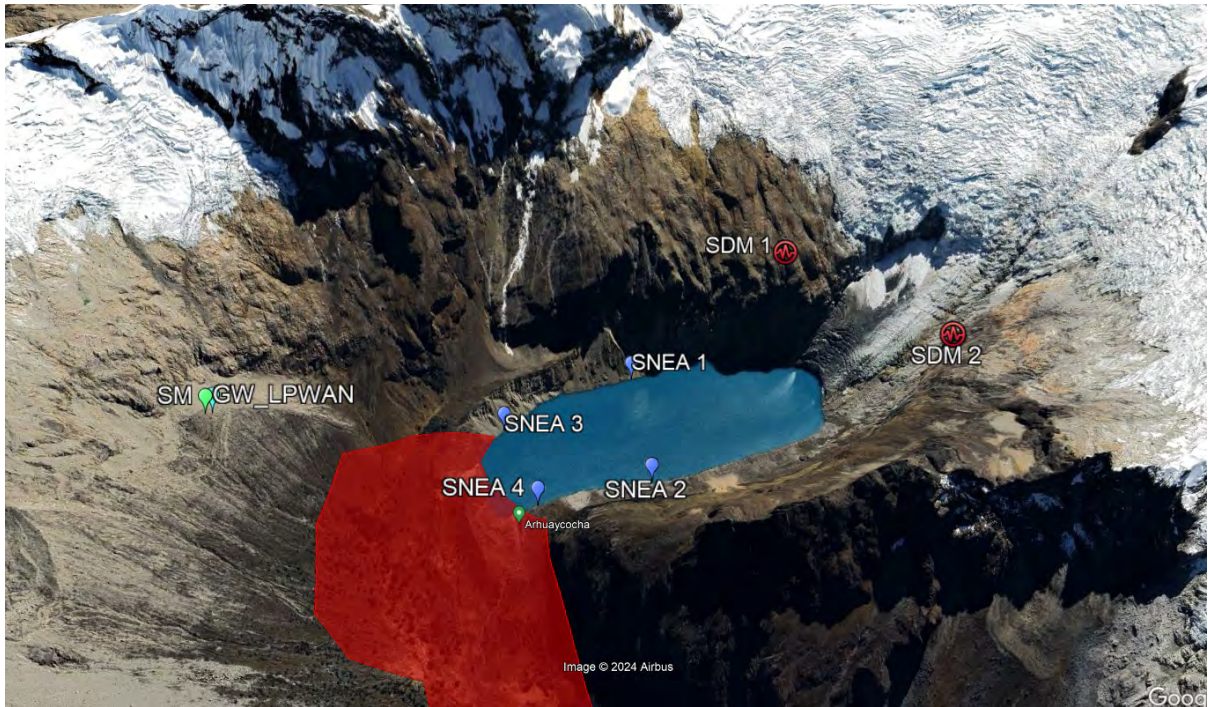


Figura 3.14: Ubicación del Gateway LPWAN (GW_LPWAN). El gateway se ubica cerca de los Sensores Meteorológicos (SM).

Componente de red	Código	Latitud	Longitud
Gateway LP-WAN	GW_LPWAN	-8.885838	-77.638128

Tabla 3.10: Ubicación geográfica del Gateway LPWAN.

3.7.3. Especificaciones técnicas del Gateway LPWAN

Existen diferentes marcas y modelos de Gateways LPWAN. Para el diseño, se eligió un gateway con características industriales que aseguren su funcionamiento de la red en condiciones extremas de alta montaña. En la Tabla 3.11, se describen las características técnicas del UG67 Outdoor LoRaWAN Gateway.

Especificaciones LP-WAN (LoRaWAN)	Detalles Técnicos
Antenas	2 Internal Antennas 2 x 50 ohm N-Female External Connectors
Canales	8 (Half/Full-duplex)
Banda de Frecuencia	CN470/IN865/EU868/RU864 /US915/AU915/KR920/AS923-1,2,3,4
Sensibilidad	-140dBm @292bps (Lora CHIP SX1302)
Potencia	Maxima 27dBm
Protocolo	V1.0 Class A/Class B/Class C and V1.0.2 Class A/Class B/Class C
Grado de protección	IP67
Consumo eléctrico	Typical 3.6 W, Max 4.8 W

Tabla 3.11: Características técnicas del gateway de comunicaciones UG67 de la marca Milesight.

El UG67 está diseñado para funcionar en exteriores e integra diferentes protocolos de comunicación como: DHCP, DDNS, HTTP, HTTPS, DNS, ARP, SNTP, Telnet, SSH, MQTT. Las tareas de administración y configuración se realizan mediante un gestor web y soporta la integración con plataformas externas mediante su Kit de Desarrollo de Software (SDK) en Python y Node-RED.

3.7.4. Estimación de la cobertura espacial del Gateway LP-WAN

La cobertura del gateway se estimó utilizando modelos de propagación semi-empíricos: Línea de Vista (LOS), Okumura-Hata, ITU-R P1546 y Cost231-Hata. Estos modelos fueron seleccionados por estar diseñados para frecuencias que coinciden con los rangos de operación típicos de las redes LPWAN, comprendidos entre 150 MHz y 2 GHz. Estas frecuencias son comunes en tecnologías LPWAN como LoRaWAN, Sigfox y NB-IoT, lo que permite evaluar la atenuación de la señal en distintos entornos (urbanos, suburbanos y rurales) y bajo diversas condiciones de transmisión.

La simulación del modelo se realizó en el sistema web CloudRF. El modelo de elevación digital del terreno utilizado fue el SRTM1 con una resolución espacial de 30 metros [USG, 2018]. Del análisis de vegetación, se concluye que en la zona de estudio la vege-

tación es dispersa o de menor densidad, lo cual no produce cambios significativos en la aplicación de los modelos.

Análisis de Línea de Vista

Se calcularon las zonas donde no existe obstrucción en un radio de 3 km tomando como centro la posición del gateway (GW_LPWAN). En la Figura 3.15, se muestra que los Sensores de Nivel de Espejo Agua (SNEA) y los Sensores de Deslizamiento de Masas (SDM) se ubican en zonas sin obstrucciones directas al gateway. El área en verde representa las zonas sin obstrucción como colinas, arboles, edificaciones.

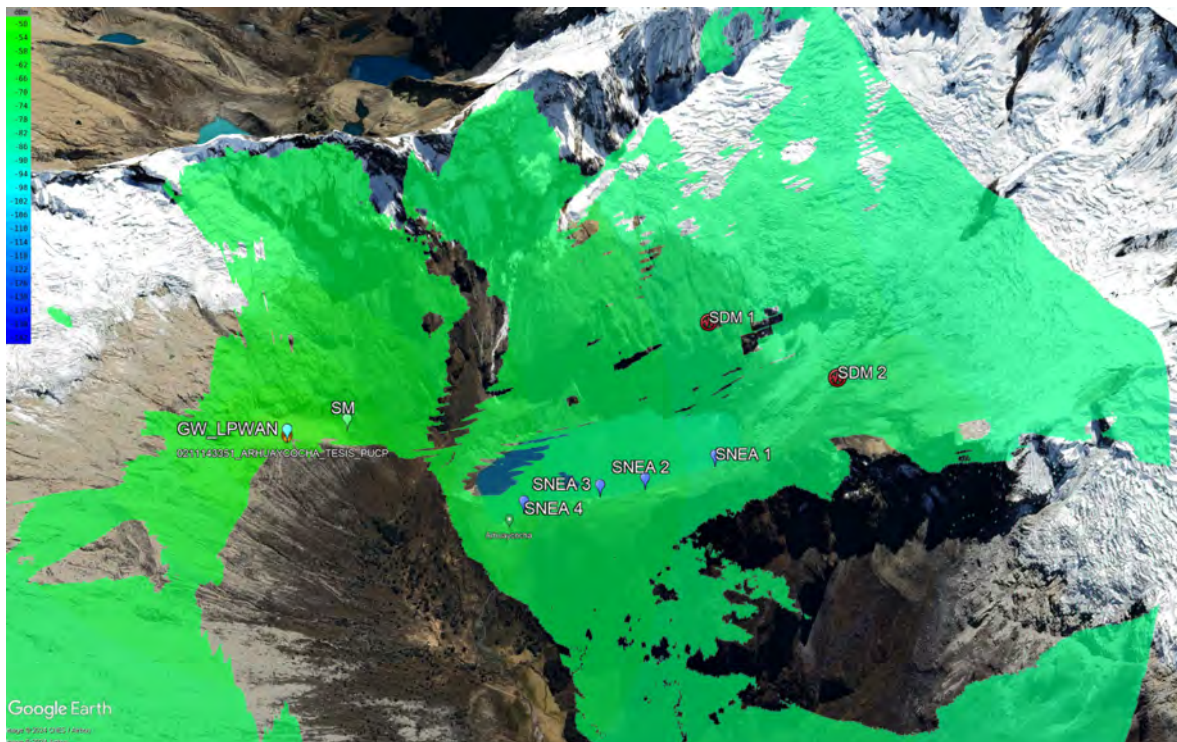


Figura 3.15: Análisis de línea de vista del Gateway LPWAN hacia los sensores ambientales (SDM, SNEA, SM). Radio de cálculo 3 km.

Escenarios de simulación

Para el cálculo de la señal recibida en el Gateway LPWAN, se realizaron seis experimentos o simulaciones, utilizando combinaciones de parámetros para: la potencia, ganancia y la altura de los transmisores (Tx) y receptores (Rx). Los parámetros para la altura de los transmisores y receptores se eligieron en función a los límites del modelo del Okumura-Hata y Cost231-Hata, por ejemplo, en estos modelos la altura del receptor solo admite valores en el rango de 1-10 metros. El modelo ITU no tiene esta limitación. Para efectos de uniformizar las comparaciones se estableció un límite de 10 metros en la altura del receptor. Los parámetros como la ganancia y potencia de los Tx y Rx se seleccionaron en función las especificaciones técnicas de los equipos seleccionados para

los nodos. La ganancia de la antena también se seleccionó en función de especificaciones técnicas para el Gateway LPWAN.

Para la primera simulación, se presentan una combinación de parámetros mínimos, mientras que en la sexta simulación los valores son máximos. Para las simulaciones intermedias se consideran variaciones arbitrarias. Considerando que cada simulación debe aplicarse a cada sensor (nodo), en total se realizaron 42 simulaciones. La finalidad de variar los parámetros fue identificar su influencia y la correlación en el cálculo de la atenuación.

Simulación	Parámetros de configuración				
	Altura Tx (m)	Ganancia Tx (dBi)	Potencia Tx (dBm)	Altura Rx (m)	Ganancia Rx (dBi)
Simulación 1	3	1.8	16	3	5
Simulación 2	6	4.2	19	6	8
Simulación 3	6	6	20	9	11
Simulación 4	3	6	20	10	8
Simulación 5	6	6	20	10	11
Simulación 6	9	6	20	10	11

Tabla 3.12: Diseño de experimentos y parámetros de configuración utilizados para el cálculo de atenuación.

Resultados de la simulación Okumura-Hata

El modelo Okumura-Hata es un modelo empírico utilizado para predecir la pérdida de propagación de señal en áreas urbanas, suburbanas y rurales. Está basado en mediciones realizadas por Okumura y adaptado por Hata para frecuencias entre 150 MHz y 1500 MHz, y distancias de hasta 20 km. Los parámetros que utiliza incluyen la frecuencia de operación (f) en MHz, la altura de la antena de la estación base (h_b) y del receptor (h_m), la distancia entre el transmisor y el receptor (d), y el tipo de entorno (urbano, suburbano o rural).

Los resultados de las simulaciones aplicando el modelo Okumura-Hata muestran que la potencia recibida en el Gateway LPWAN tiene una alta correlación con la distancia de separación entre el gateway y los sensores (Figura 3.16). Por ejemplo, para el sensor SDM2, el cual está más alejado del gateway, se obtienen valores mínimos de potencia, lo cual es consistente en todas las simulaciones. El sensor SNEA 3, es el más cercano en distancia al gateway, y en consecuencia presenta mayores valores de potencia. Esta tendencia se refuerza observando la similitud de estimaciones para los sensores SNEA 1 y 2, cuyas distancias al gateway son similares (1.228 km y 1.262 km respectivamente).

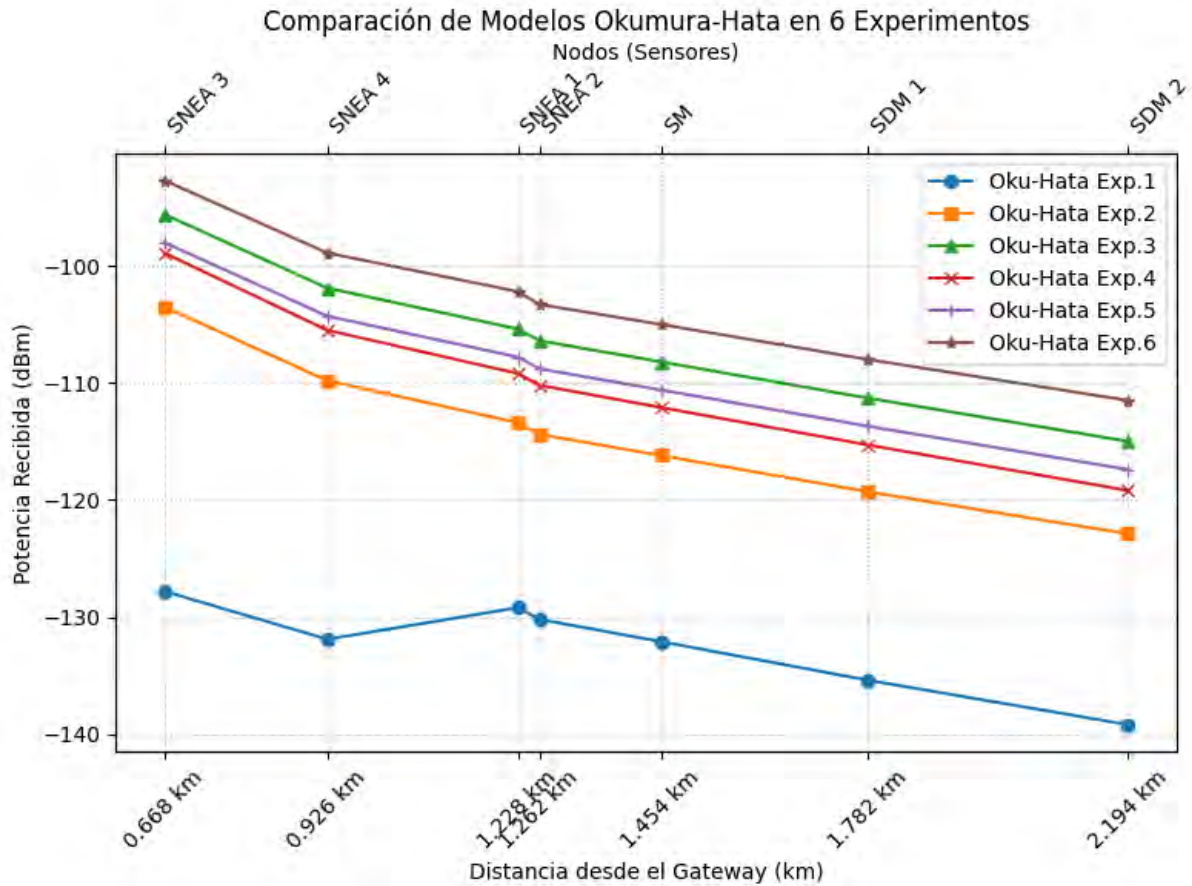


Figura 3.16: Estimaciones de potencia recibida en el Gateway LPWAN aplicando el modelo Okumura-Hata. En el eje Y se muestra la potencia recibida por el Gateway LPWAN. En el eje X superior e inferior, se muestran los sensores ordenados de menor a mayor con respecto a la distancia que los separa del gateway.

En figura anterior, en casi todas las simulaciones se observa una mejora en la potencia recibida a medida que la distancia de separación entre el gateway y los sensores disminuye. Sin embargo, en la simulación 1, se observa que SNEA 1 y SNEA 2 presentan mejores valores de potencia que SNEA 4 a pesar de estar más alejados del gateway. Esta excepción se explica analizando la Figura 3.17. En dicho gráfico se muestra el perfil de conexión entre el gateway y SNEA 4. La configuración de parámetros del primer experimento, en especial la altura de 3 metros del gateway, causa una obstrucción del terreno en la ubicación del gateway (Figura 3.17, círculo rojo). Esto provoca una pérdida de línea de vista y la obstrucción del 100% de la zona de Fresnel, lo cual impacta drásticamente en una reducción significativamente la potencia recibida.

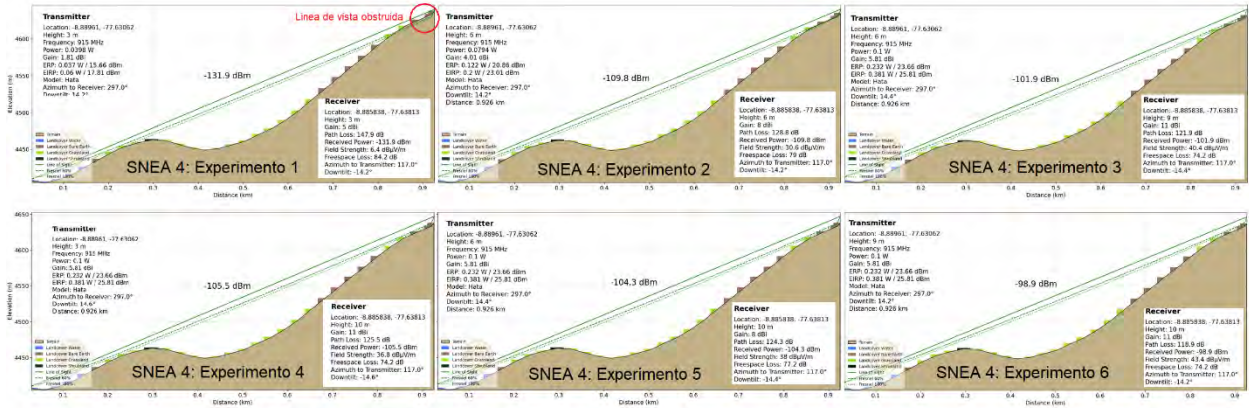


Figura 3.17: Cambios en la potencia recibida en el gateway LPWAN y el sensor SNEA4.

Aunque se observa una tendencia clara entre la señal recibida en el gateway y la distancia de los sensores, la potencia recibida no depende únicamente de la distancia de separación entre el transmisor (sensores) y el receptor (gateway), sino también de otros parámetros como la potencia del transmisor y del receptor, la ganancia de las antenas, la altura de elevación del transmisor y del receptor, entre otros.

Bajo las condiciones simuladas y para el caso concreto de Okumura-Hata, se observó que los parámetros con mayor influencia en la potencia recibida son la ganancia de la antena y la potencia del transmisor ($r=0.96$ y $r=0.97$, Figura 3.18). Por otro lado, la altura del transmisor presenta una baja correlación con la potencia recibida ($r=0.68$, Figura 3.18). Esto indica que un aumento en la potencia del transmisor (de 16 dBm a 19 dBm) y en la ganancia de la antena transmisora (de 1.8 dBi a 4.2 dBi) resulta más beneficioso que una mejora estructural de las torres (de 3 m a 9 m), este resultado es provechoso porque permitiría reducir el esfuerzo logístico de transporte de materiales. En ambientes montañosos, donde no existen caminos o carreteras. Considerando que el transporte de materiales depende de animales de carga y personas, reducir la altura de las torres de 9 m a 6 m, o incluso a 3 m, disminuiría el peso de carga y, en consecuencia, optimizaría la logística de una futura implementación.

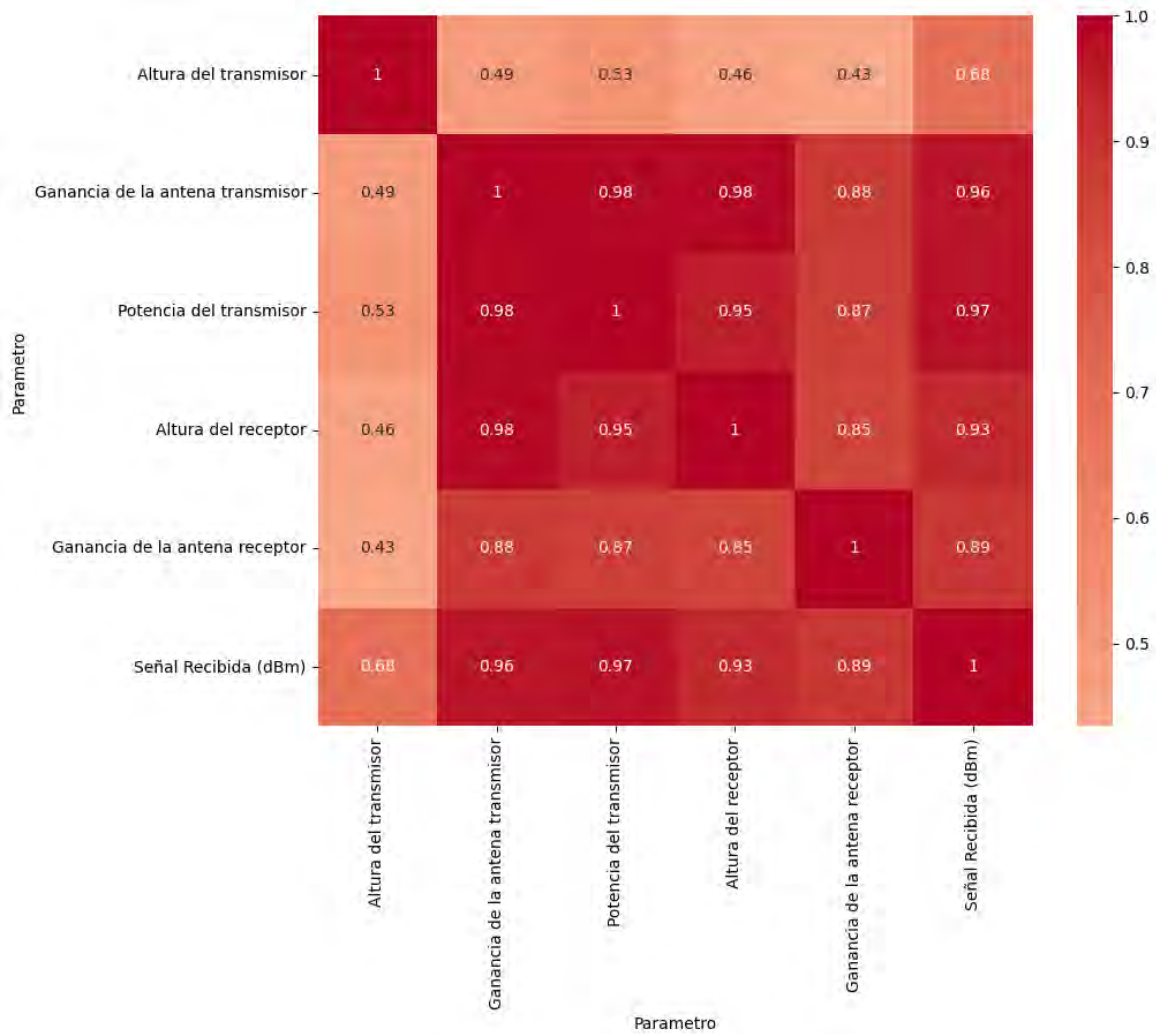


Figura 3.18: Correlación entre los factores de las simulaciones y la señal recibida en el Gateway LPWAN bajo el modelo Okumura-Hata.

Resultados de la simulación COST231-Hata

Los resultados de las simulaciones del modelo Cost231-Hata muestran que la potencia recibida sigue un patrón similar al del modelo Okumura-Hata, lo cual se debe a que ambos modelos están estrechamente relacionados. Comparando la primera simulación entre ambos modelos (líneas azules, Figura 3.19), se observa que los resultados muestran un patrón bastante parecido, con una diferencia promedio de -1 dB. Sin embargo, a medida que los parámetros del transmisor y receptor cambian, las diferencias promedio se incrementan.

Por ejemplo, la segunda simulación muestra una diferencia promedio de -5 dB, la tercera -11 dB, y la cuarta, quinta y sexta -13 dB. Estas diferencias en la señal recibida indican que, para el caso de estudio, el modelo Cost231-Hata tiende a estimar potencias más altas en comparación con el modelo Okumura-Hata. Esto se aprecia mejor en las líneas continuas roja, violeta, verde y marrón de la Figura 3.19, que se encuentran por encima de las líneas discontinuas del modelo Okumura-Hata.

En la Figura 3.19 también se observa que los resultados de tercera y quinta simulación son muy parecidos, con una diferencia promedio de -0.46 dB para cada sensor. La diferencia más significativa entre ambas simulaciones fue la reducción en la ganancia de la antena del receptor, pasando de 11 dBi a 8 dBi, lo cual sugiere que este parámetro no tiene un impacto considerable en el modelo Cost231-Hata. Esto indica que una variación de ± 3 dB (50%) en este parámetro no influye significativamente en el valor estimado de la señal recibida.

Un caso similar se observa entre la segunda simulación de Cost231-Hata y la quinta simulación de Okumura-Hata, que muestran resultados casi equivalentes, con una diferencia promedio mínima de -0.01 dB. Esto indica que pequeñas mejoras combinadas en factores como la potencia del transmisor y la altura del receptor en Cost231-Hata conducen a estimaciones de señal más altas en comparación con el modelo Okumura-Hata.

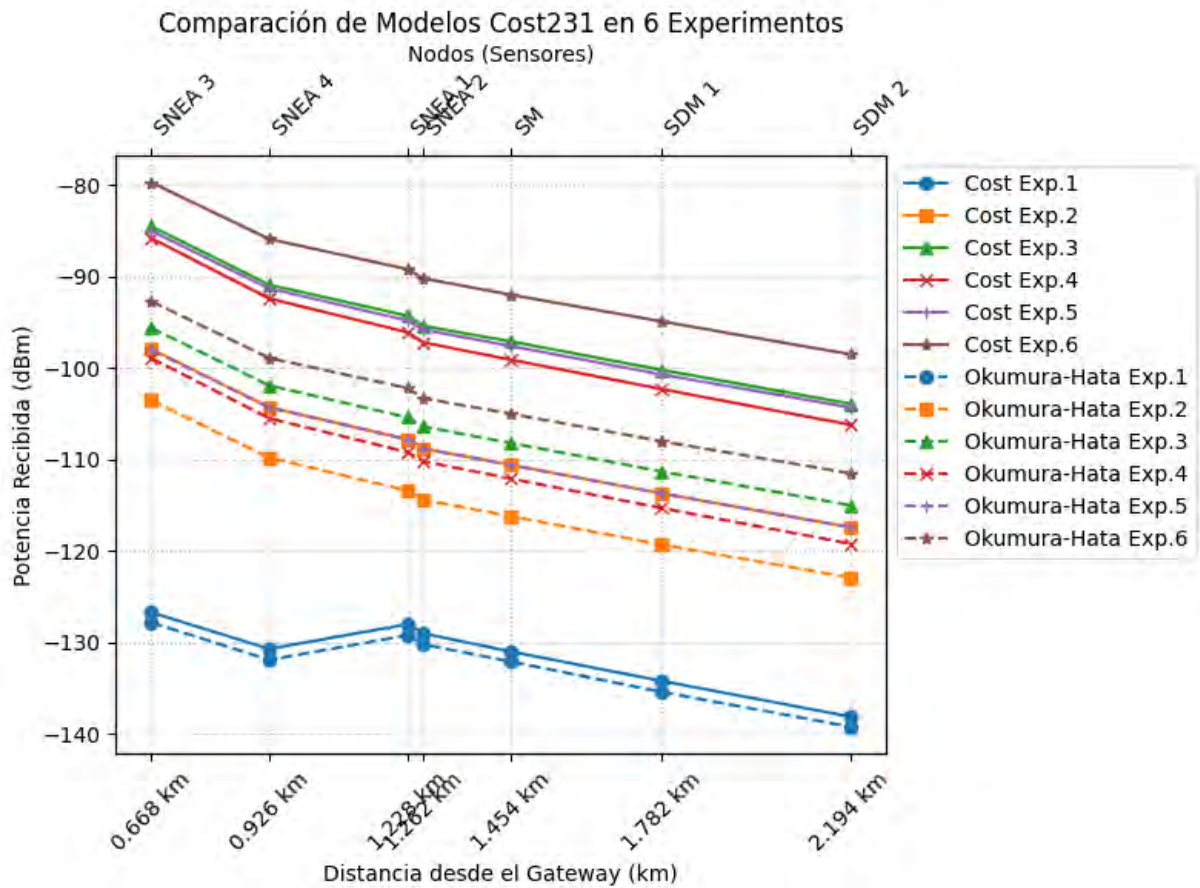


Figura 3.19: Estimación de potencia recibida en el Gateway LPWAN aplicando el modelo Cost231-Hata y comparación con los resultados del modelo Okumura-Hata. Las líneas continuas corresponden a Cost231-Hata y las líneas discontinuas corresponden al modelo Okumura-Hata. Las simulaciones realizadas bajo los mismos parámetros presentan el mismo color.

La idea anterior se refuerza analizando la correlación entre la señal recibida y los parámetros utilizados en las simulaciones (Figura 3.20). Se observa que la señal recibida en el gateway está altamente correlacionada con la ganancia de la antena del transmisor, la potencia del transmisor ($r=0.99$, $r=0.98$, Figura 3.20). Esto indica que un incremento

en la potencia o ganancia del transmisor influyen considerablemente en la potencia de la señal recibida por el gateway.

Además, la alta correlación con la altura del receptor ($r=0.97$) confirma que este parámetro es un factor relevante en Cost231-Hata, al igual que en el modelo de Okumura-Hata. Por otro lado, siguiendo el patrón de Okumura-Hata, se observa que las mejoras en la altura del transmisor no producen mejoras sustanciales ($r=0.62$), lo cual confirma la idea de que resulta más beneficioso priorizar las mejoras en la potencia y la ganancia sobre la altura de los receptores.



Figura 3.20: Correlación entre los factores de las simulaciones y la señal recibida en el Gateway LPWAN bajo el modelo Cost231-Hata.

Resultados de la simulación ITU-R P1546

Los resultados del modelo ITU-R P1546 son considerablemente más optimistas en comparación con los resultados de los modelos anteriores (Okumura-Hata y Cost231-Hata). ITU-R P1546 presenta estimaciones más elevadas en la señal recibida, con valores de hasta -19 dB de diferencia promedio en comparación con Okumura-Hata y de -9 dB de

diferencia promedio con Cost231-Hata. Estas diferencias podrían explicarse en la naturaleza del modelo ITU-R P1546 que fue desarrollado a base de mediciones empíricas y curvas de tendencia orientadas a servicios de radio difusión en rangos de gran alcance (hasta 1000 km). La recomendación de ITU indica que, al usarse en los rangos menores de 1 km, el modelo se está extrapolando más allá de donde las curvas y tablas fueron empíricamente validadas o calibradas, lo cual podría generar una variación en las estimaciones de potencia [ITU-R, 2019]. El software CloudRF realiza esta extrapolación internamente.

El patrón de las estimaciones del modelo ITU-R P1546 se asemeja a la tendencia de valores obtenidos con los modelos anteriores (Figura 3.21). La tendencia en común más significativa es la mejora que se experimenta pasando de la primera a la segunda simulación (Línea azul y naranja, Figura 3.21), con una diferencia promedio de hasta -31 dB. Este patrón también se repite en los resultados obtenidos con los modelos Okumura-Hata y Cost231-Hata. En base a estos resultados, se observa que la combinación de parámetros de la primera simulación (ver Tabla 3.12) arroja los valores mínimos de potencia en todos los modelos.

Un caso particular en ITU-R P1546 son los resultados similares que se obtienen en la segunda y cuarta simulación, con -0.1 dB de diferencia promedio. Los cambios en la combinación de parámetros para pasar de la segunda a la cuarta simulación son las siguientes: La altura del transmisor se redujo de 6 m a 3 m, la ganancia de la antena del transmisor paso de 4.2 dBi a 5.81 dBi, la potencia del transmisor paso de 19 dBm a 20 dBm, la altura del receptor se incrementó de 6 m a 10 m, y la ganancia de la antena del receptor se incrementó de 8 dBi a 11 dBi. Este efecto casi imperceptible también podría explicarse por la extrapolación del modelo en el software CloudRF, mostrando diferencias casi imperceptibles para variaciones de los parámetros de menor escala.

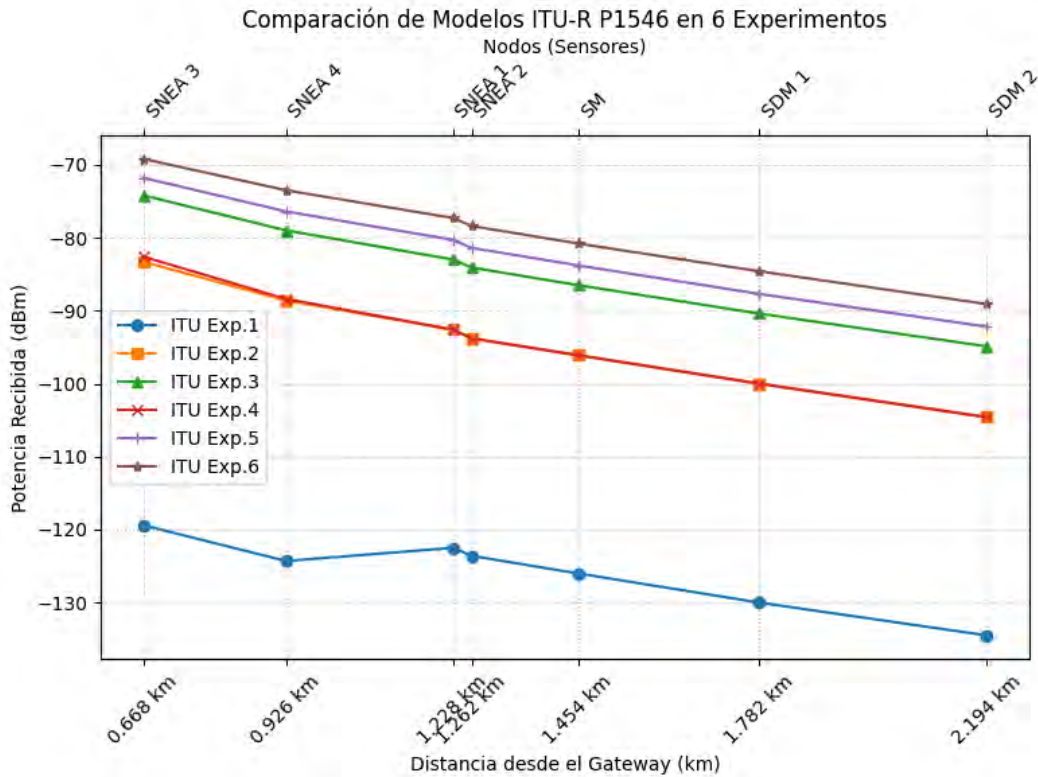


Figura 3.21: Estimaciones de potencia recibida en el Gateway LPWAN aplicando el modelo ITU-R P1546. En el eje Y se muestra la potencia recibida por el Gateway LPWAN. En el eje X superior e inferior, se muestran los sensores ordenados de menor a mayor con respecto a la distancia que los separa del gateway.

Cálculo del Ruido de Fondo

El ruido de fondo en ambientes de montaña, donde generalmente no existen infraestructuras de comunicaciones ni fuentes artificiales de interferencia, tiende a estar dominado por las fuentes de ruidos naturales, como el ruido térmico, el ruido galáctico/cósmico y las interferencias de radio frecuencia (RF) esporádicas. Para este cálculo, solo se consideró el ruido térmico puesto que depende de la temperatura ambiente. Además, no se toma en cuenta el ruido galáctico y las interferencias de RF, debido a que estas fuentes de ruido surgen tras eventos astronómicos o solares poco habituales, y las interferencias RF son despreciables debido a la compleja topografía de las montañas.

Para obtener la potencia del ruido térmico en decibelios-milivatios (dBm), se utiliza la ecuación de ruido térmico de Johnson-Nyquist.

$$PN(W) = k \cdot T \cdot B$$

- $PN(W)$ es la potencia de ruido en vatios.
- k es la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$)
- T es la temperatura en grados Kelvin.

- B es el ancho de banda del canal en hercios (Hz).

Para la conversión de la potencia del ruido térmico a dBm se aplica siguiente la fórmula:

$$PN(dBm) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{PN(W)}{1mW} \right)$$

Donde, $1mW$ (miliwatio) es la referencia utilizada para la conversión a dBm.

La ecuación anterior describe como el ruido de fondo se incrementa linealmente con la temperatura (Figura 3.22). Considerando que en las montañas andinas las temperaturas son generalmente bajas y asumiendo un intervalo de 0-20 °C, se obtiene un ruido de fondo promedio de -123 dBm para un ancho de banda de 125 kHz.

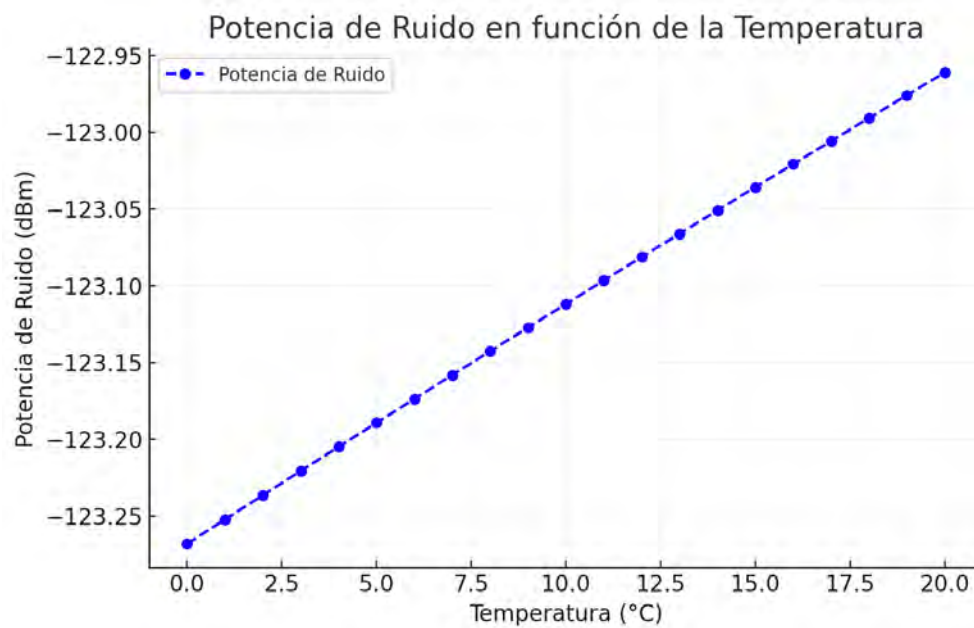


Figura 3.22: Variación de la potencia de ruido térmico en función de la temperatura para un ancho de banda de 125 kHz aplicando el modelo de Johnson-Nyquist.

En la siguiente Figura 3.23, la línea de color negro representa el ruido de fondo (-123 dBm). Junto a esta línea, también se muestran las potencias estimadas por cada simulación y modelo. Los resultados de la primera simulación para los tres modelos analizados presentan las potencias más bajas en relación al ruido de fondo.

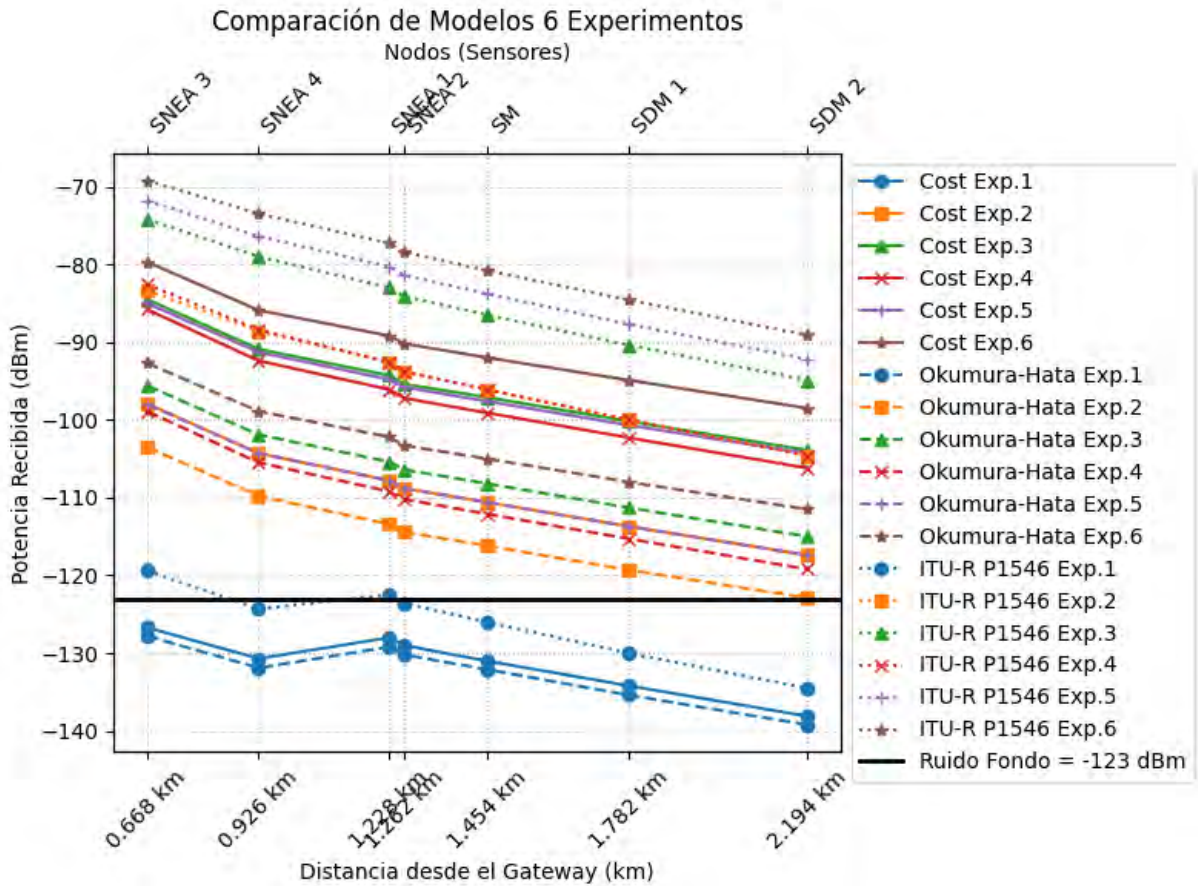


Figura 3.23: Estimación de las potencias recibidas en el Gateway LPWAN y su relación con el Ruido de Fondo. La línea negra representa el valor promedio de Ruido de Fondo.

Cálculo de la disponibilidad de los enlaces

Para el cálculo de la disponibilidad de los enlaces se utilizaron los resultados de la primera simulación en todos los modelos (líneas azules, Tabla 3.13, Figura 3.23), porque presentan la combinación mínima de recursos, tanto estructurales como electrónicos.

N.	Sensor	Distancia (km)	Resultados primera simulación		
			Okumura-Hata (dBm)	COST231-Hata (dBm)	ITU-R P1546 (dBm)
1	SNEA 3	0.668	-127.8	-126.7	-119.4
2	SNEA 4	0.926	-131.9	-130.7	-124.3
3	SNEA 1	1.228	-129.2	-128.0	-122.5
4	SNEA 2	1.262	-130.2	-129.0	-123.6
5	SM	1.454	-132.1	-131.0	-126.0
6	SDM 1	1.782	-135.4	-134.2	-130.0
7	SDM 2	2.194	-139.2	-138.1	-134.5

Tabla 3.13: Potencias recibidas en la primera simulación para los tres modelos, ordenadas según la distancia de separación al Gateway LPWAN.

El margen de enlace o *fade margin* (FM) para cada sensor y modelo se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$FM = P_{rx} - \text{Sensibilidad},$$

donde P_{rx} es la potencia recibida en dBm.

En este caso de estudio se utilizará una sensibilidad de -140 dBm, compatible con el chip SX1302 del gateway Milesight UG67. En este caso de estudio se utilizará una sensibilidad de -140 dBm, compatible con el chip SX1302 del gateway Milesight UG67 (ver Tabla 3.11). Este equipo permite distintas configuraciones de sensibilidad según el Spreading Factor (SF). A mayor SF, se incrementa la sensibilidad y el alcance de la señal, aunque se reduce el ancho de banda y la velocidad de transmisión. La siguiente tabla muestra los valores típicos de sensibilidad disponibles según el SF.

Cabe precisar que el ancho de banda (BW) utilizado en los cálculos de ruido térmico, de 125 kHz, coincide con el BW empleado por la tecnología LoRa en esta configuración, lo que garantiza coherencia entre los parámetros físicos considerados para el cálculo del SNR y la sensibilidad.

SF	Sensibilidad típica (dBm)
SF5	-121
SF6	-123.5
SF7	-127
SF8	-129
SF9	-132.5
SF10	-135.5
SF11	-138
SF12	-141

Tabla 3.14: Sensibilidad del chip LoRa SX1302 según el factor de dispersión (SF).

Sensor	Okumura-Hata		COST231-Hata		ITU-R P1546	
	P_{rx} (dBm)	FM (dB)	P_{rx} (dBm)	FM (dB)	P_{rx} (dBm)	FM (dB)
SNEA 3	-127.8	12.2	-126.7	13.3	-119.4	20.6
SNEA 4	-131.9	8.1	-130.7	9.3	-124.3	15.7
SNEA 1	-129.2	10.8	-128.0	12.0	-122.5	17.5
SNEA 2	-130.2	9.8	-129.0	11.0	-123.6	16.4
SM	-132.1	7.9	-131.0	9.0	-126.0	14.0
SDM 1	-135.4	4.6	-134.2	5.8	-130.0	10.0
SDM 2	-139.2	0.8	-138.1	1.9	-134.5	5.5

Tabla 3.15: Fade margin ($FM = P_{rx} - (-140\text{dBm})$) y potencias recibidas para los tres modelos.

Luego, si X representa la variabilidad lenta o *shadowing* del canal (en dB), se asume que $X \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$, y la probabilidad de que, debido a la variación, la señal se reduzca por debajo de la sensibilidad (es decir, ocurra un “outage”) es

$$P_{\text{outage}} = \Pr \{X > FM\} = Q\left(\frac{FM}{\sigma}\right),$$

donde $Q(x)$ es la función cola de la distribución normal estándar:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt.$$

Finalmente, la disponibilidad sería:

$$\text{Disponibilidad} = 1 - P_{\text{outage}}.$$

Las siguientes tablas muestran los resultados de la probabilidad de *outage* y la disponibilidad del sistema para cada sensor en los tres modelos de propagación: ITU-R P1546, COST231-Hata y Okumura-Hata, asumiendo una desviación estándar del canal $\sigma = 8$ en base al estudio de [Chandrasekharan et al., 2015].

El modelo Okumura-Hata, muestra los valores más bajos de *fade margin* en general. SNEA 3 conserva buen rendimiento con 93.6 % de disponibilidad. SDM 1 y SDM 2 tienen las peores condiciones de enlace: SDM 1: FM/8 de 0.58 = 71.9 % de disponibilidad. SDM 2: FM/8 de apenas 0.10 = solo 54.0 % de disponibilidad, lo cual representa un alto riesgo de desconexión.

Sensor	FM/8	$P_{\text{outage}} = Q(\text{FM}/8)$	Disponibilidad
SNEA 3	1.52	$Q(1,52) \approx 0,064$	93.6 %
SNEA 4	1.01	$Q(1,01) \approx 0,155$	84.5 %
SNEA 1	1.35	$Q(1,35) \approx 0,089$	91.1 %
SNEA 2	1.23	$Q(1,23) \approx 0,110$	89.0 %
SM	0.99	$Q(0,99) \approx 0,162$	83.8 %
SDM 1	0.58	$Q(0,58) \approx 0,281$	71.9 %
SDM 2	0.10	$Q(0,10) \approx 0,460$	54.0 %

Tabla 3.16: Modelo Okumura-Hata – Probabilidad de outage y disponibilidad del sistema para cada sensor, con $\sigma = 8$ dB.

El modelo COST231-Hata, arroja valores ligeramente inferiores en comparación con ITU-R P1546. SNEA 3 nuevamente muestra altos con una disponibilidad del 95.2%. SNEA 4 y SM presentan valores moderados de disponibilidad (87–88 %). SDM 2 cae significativamente con una probabilidad de *outage* del 40.8 % y disponibilidad de solo 59.2 %, lo que evidencia vulnerabilidad a pérdidas de señal bajo este modelo.

Sensor	FM/8	$P_{\text{outage}} = Q(\text{FM}/8)$	Disponibilidad
SNEA 3	1.66	$Q(1,66) \approx 0,048$	95.2 %
SNEA 4	1.16	$Q(1,16) \approx 0,123$	87.7 %
SNEA 1	1.50	$Q(1,50) \approx 0,067$	93.3 %
SNEA 2	1.38	$Q(1,38) \approx 0,084$	91.6 %
SM	1.13	$Q(1,13) \approx 0,130$	87.0 %
SDM 1	0.73	$Q(0,73) \approx 0,232$	76.8 %
SDM 2	0.24	$Q(0,24) \approx 0,408$	59.2 %

Tabla 3.17: Modelo COST231-Hata – Probabilidad de outage y disponibilidad del sistema para cada sensor, con $\sigma = 8$ dB.

El modelo ITU-R P1546 presenta los mejores márgenes de enlace (FM/8) y, en consecuencia, las mayores disponibilidades. SNEA 3, con un FM/8 de 2.58, alcanza una disponibilidad de 99.5 %, lo que lo convierte en el enlace más robusto. SNEA 1 y SNEA 2 mantienen también altos márgenes (FM/8 >2.0), resultando en disponibilidades superiores al 98 %. SDM 2, con el FM/8 más bajo (0.69), tiene una disponibilidad de 75.4 %, evidenciando un posible problema de confiabilidad en este enlace. Se observa que la disponibilidad del sistema depende fuertemente del modelo de propagación utilizado y de la calidad del enlace en términos de *fade margin*. ITU-R P1546 ofrece las predicciones más optimistas y estables. Okumura-Hata, siendo más conservador, penaliza duramente a los nodos más alejados o en condiciones de propagación más severas.

Sensor	FM/8	$P_{\text{outage}} = Q(\text{FM}/8)$	Disponibilidad
SNEA 3	2.58	$Q(2,58) \approx 0,005$	99.5 %
SNEA 4	1.96	$Q(1,96) \approx 0,025$	97.5 %
SNEA 1	2.19	$Q(2,19) \approx 0,014$	98.6 %
SNEA 2	2.05	$Q(2,05) \approx 0,020$	98.0 %
SM	1.75	$Q(1,75) \approx 0,040$	96.0 %
SDM 1	1.25	$Q(1,25) \approx 0,106$	89.4 %
SDM 2	0.69	$Q(0,69) \approx 0,246$	75.4 %

Tabla 3.18: Modelo ITU-R P1546 – Probabilidad de outage y disponibilidad del sistema para cada sensor, con $\sigma = 8$ dB.

Cálculo relación señal-ruido (SNR)

La relación señal-ruido (SNR) es un indicador que compara el nivel de la señal recibida en el receptor (gateway) con el nivel de ruido de fondo. Una señal recibida más alta, en relación con el nivel de ruido, resulta en un SNR mayor, lo que se interpreta en una mejor calidad de la señal y una mayor tasa de bits.

La expresión matemática para calcular el SNR en decibelios (dB) viene dada por:

$$SNR(dB) = P_{rx} - P_{ruido}$$

Donde:

- SNR es la Relación señal ruido,
- P_{rx} Potencia de la señal útil recibida (dBm),
- P_{ruido} es la potencia del ruido de fondo. También se mide en dBm,

En el cálculo del SNR se espera que la diferencia entre la potencia de la señal recibida en el gateway y la potencia del ruido de fondo arroje valores positivos de SNR. Sin embargo, las tecnologías LPWAN como LoRa expanden la interpretación clásica del SNR, según la cual el ruido de fondo es el umbral mínimo por debajo del cual una señal no puede distinguirse con métodos convencionales, como técnicas de modulación (QPSK, FSK, GFSK, QAM, etc.) o receptores analógicos (FM, AM).

No obstante, la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS) de LoRa permite operar con valores negativos de SNR. De acuerdo con el fabricante de LoRa (Semtech), CSS permite demodular señales recibidas en el receptor por debajo del ruido de fondo, en un rango de -5 dB hasta -20 dB [Semtech, 2022]. Además, se han desarrollado experimentos en los que se ha logrado extender aún más este rango hasta -40 dB [Robson and Haddad, 2022].

A continuación, se calcula el SNR utilizando la fórmula:

$$SNR (dB) = P_{rx} - P_{ruido} = P_{rx} - (-123 \text{ dBm}) = P_{rx} + 123$$

N.	Nodo/Sensor	Distancia (km)	Ruido Fondo (dBm)	Relación Señal Ruido (SNR) (dB)		
			-123 dBm	Okumura-Hata	COST231-Hata	ITU-R P1546
1	SNEA 3	0.668	-123	-4.8	-3.7	3.6
2	SNEA 4	0.926	-123	-8.9	-7.7	-1.3
3	SNEA 1	1.228	-123	-6.2	-5.0	0.5
4	SNEA 2	1.262	-123	-7.2	-6.0	-0.6
5	SM	1.454	-123	-9.1	-8.0	-3.0
6	SDM 1	1.782	-123	-12.4	-11.2	-7.0
7	SDM 2	2.194	-123	-16.2	-15.1	-11.5

Tabla 3.19: Relación Señal Ruido (SNR) para diferentes modelos de propagación utilizando un ruido de fondo de -123 dBm.

3.7.5. Oferta de la velocidad de transmisión de datos LPWAN

Tomando los valores calculados de la Relación Señal Ruido (SNR) en la Tabla 3.19, se calculó la velocidad de transmisión de datos para todos los sensor. Para ello, se utilizó el teorema de Shannon-Hartley.

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (3.1)$$

Donde:

- C es la capacidad del canal en bits por segundo (bps).
- B es el ancho de banda del canal en Hertz (Hz).
- SNR es la relación señal-ruido, expresada en forma lineal.

N.	Nodo/Sensor	Distancia (km)	Ruido Fondo (dBm)	Capacidad de Canal (kbps)		
				Okumura-Hata	COST231-Hata	ITU-R P1546
1	SNEA 3	0.668	-123	51.6	64.1	214.8
2	SNEA 4	0.926	-123	21.9	28.3	100.0
3	SNEA 1	1.228	-123	38.8	49.6	135.7
4	SNEA 2	1.262	-123	31.5	40.4	113.0
5	SM	1.454	-123	20.9	26.5	73.3
6	SDM 1	1.782	-123	10.1	13.2	32.8
7	SDM 2	2.194	-123	4.3	5.5	12.3

Tabla 3.20: Capacidad de canal (kbps) calculada con la fórmula de Shannon-Hartley para un ancho de banda de 125 kHz y SNR obtenida con ruido de fondo de -123 dBm.

Graficando los resultados obtenidos en la tabla anterior, se observa que los modelos muestran una disminución de la capacidad conforme aumenta la distancia al gateway. Esto es esperable, ya que a mayor distancia: La atenuación de la señal es mayor. La SNR disminuye, reduciendo la capacidad según la fórmula de Shannon-Hartley.

El modelo ITU-R P1546 predice consistentemente las capacidades de canal más altas. La forma de su curva es más irregular, lo que sugiere mejor rendimiento para sensores cercanos (SNEA 3, SNEA 1) y también mejor penetración a distancias medias. SNEA 3 alcanza más de 210 kbps, mientras que SDM 2, el más lejano, desciende hasta 12.3 kbps.

El modelo COST231-Hata muestra predicciones ligeramente más optimistas que Okumura-Hata pero significativamente más conservadoras que ITU-R. Muestra una caída más pronunciada, especialmente para SDM 1 y SDM 2. Por su parte, el modelo Okumura-Hata es el modelo más conservador. Sus predicciones de capacidad son las más bajas en todos los sensores. SDM 2 apenas alcanza los 4.3 kbps, lo que indica una condición de enlace limitada.

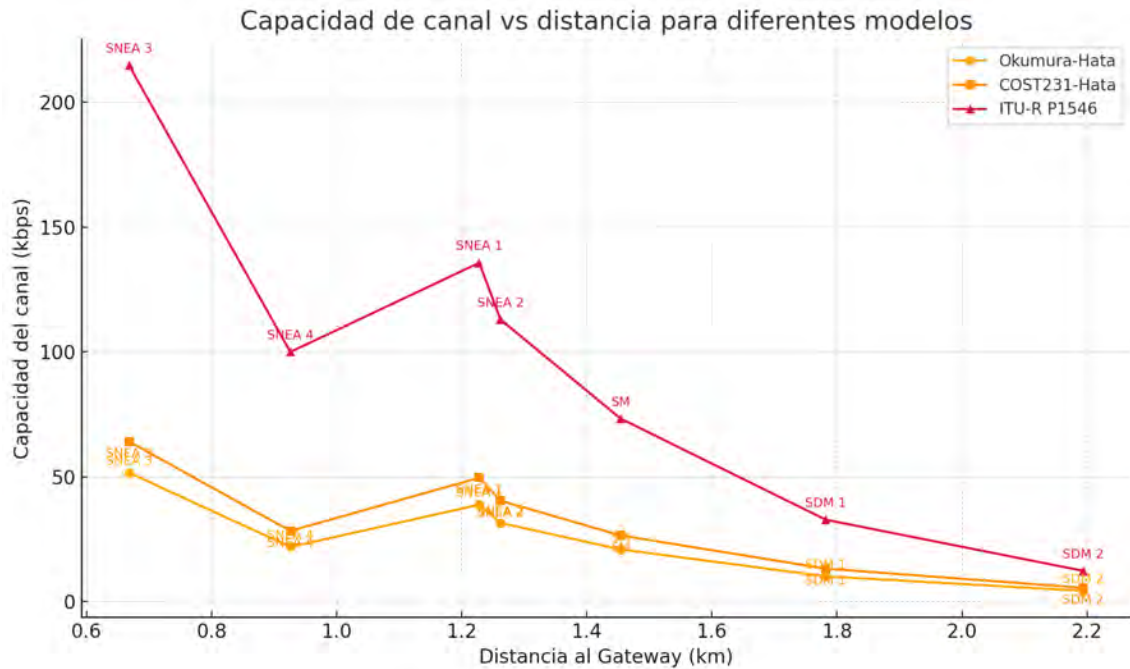


Figura 3.24: Capacidades promedio por tecnología para los sensores

3.8. Diseño de la red de transporte WIFI

La red WIFI es la red de transporte que se complementa con la red LPWAN. La idea básica es crear un medio de conexión a internet para el Gateway LPWAN. Para ello, se diseñó un conjunto de nodos repetidores, que se extienden desde el poblado más cercano con conexión a internet hasta la ubicación del Gateway LPWAN.

La ubicación de los nodos repetidores se determinó siguiendo un criterio de conveniencia técnica, basado principalmente en la experiencia empírica. Este criterio implica un conjunto de acciones y decisiones fundamentadas en el conocimiento práctico adquirido. Dado que la comunicación entre dos nodos WIFI de larga distancia requiere una línea de vista despejada, es decir, sin obstáculos entre ambos, se seleccionaron manualmente las ubicaciones utilizando un mapa de curvas de nivel en la herramienta Google Earth Pro. El nodo base se encuentra en la Municipalidad de Cashapampa, mientras que el nodo final está ubicado en la localización del Gateway LPWAN.

Se utilizó el software de simulación UISP Design Center, el cual está diseñado para simular enlaces Punto a Punto y Multipunto, especializado en la marca Ubiquiti. Como radio de comunicación se utilizó el modelo PowerBeam 5AC-300 cuyas características técnicas se describen en la tabla siguiente:


Características	Detalle	Imagen
Frecuencia de operación	5150 - 5875 MHz	
Ganancia de antena	22 dBi	
Tamaños de canal	PtP: 10/20/30/40/50/60/80 MHz PtMP: 10/20/30/40 MHz	
Polarización	Dual Lineal	
Fuente de alimentación	24V, 0.5A Gigabit PoE	
Consumo máximo	5.5W	
Conexión de fuente de poder	PoE pasivo	
Especificaciones completas	Ubiquiti Web Page	

Tabla 3.21: Características técnicas de la radio de comunicación PowerBeam 5AC-300 de la marca Ubiquiti. La radio y la antena se encuentran integradas en un único equipo.

El modelo PowerBeam 5AC-300 de Ubiquiti es una solución de banda ancha inalámbrica que opera en la banda de 5 GHz, diseñada para ofrecer una conexión estable en enlaces de larga distancia. Este equipo incorpora diversas tecnologías como las antenas direccionales de doble polaridad lineal, la tecnología MIMO, un software de gestión integrado desde el cual se configuran los parámetros de radio, además se incluye un sistema de alineación de antenas.

A continuación se observan los perfiles de conexión del segmento WIFI. Los cálculos se realizaron bajo las especificaciones de la radio PowerBeam 5AC-300, con un ancho de canal de 10 MHz.

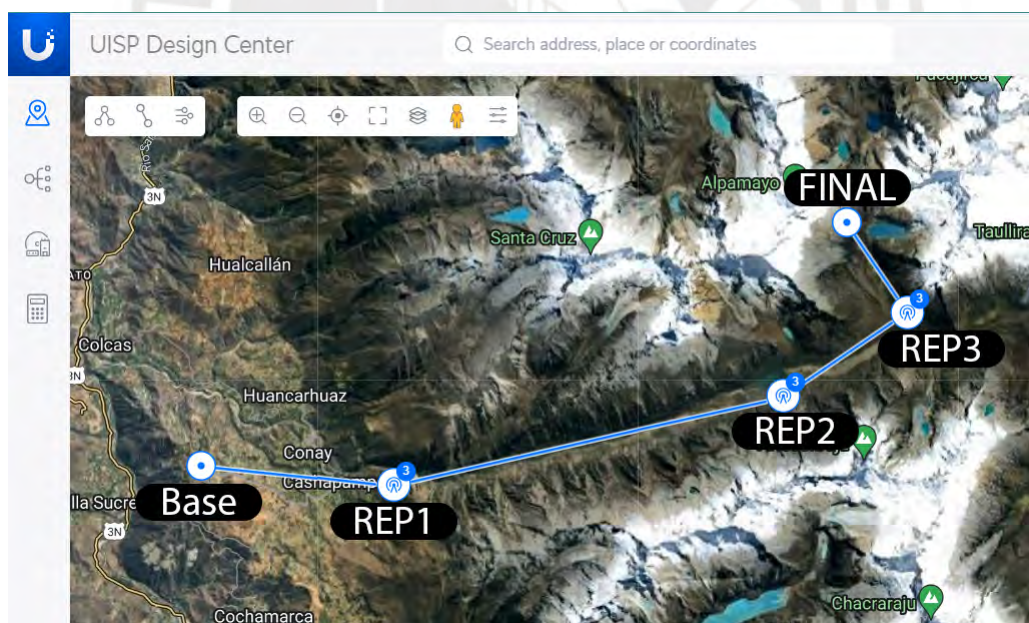


Figura 3.25: Diagrama de conexión Punto a Punto (PtP) establecido para el segmento WIFI. La base, que tiene acceso a internet, se sitúa en un punto estratégico de la Municipalidad de Cashapampa. A través de esta red PtP, la conexión se extiende hasta la ubicación remota del Gateway LPWAN.

Ubicación en Coordenas (Lat, Lon)	Nodo	-8.957025, -77.762329
	Rep1	-8.951677, -77.815207
Nodo – Rep1	Señal recibida	-68 dBm
	Estimación de la velocidad de transmisión	49.7 Mbps
	Distancia de conexión	5.91 km

Tabla 3.22: Parametros de conexión PtP del enlace entre la Base y el nodo repetidor 1 (REP1).

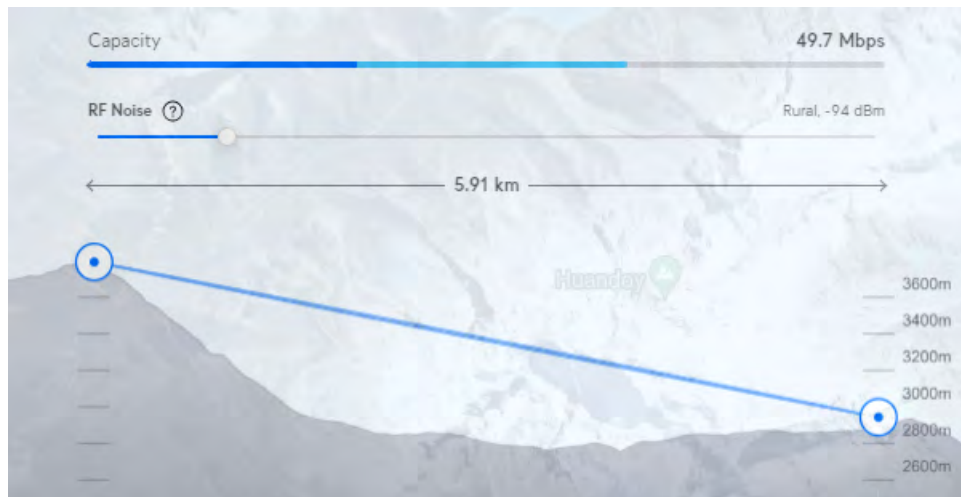


Figura 3.26: Perfil de conexión, del primer trampo de la red de transporte, entre la Base y el nodo repetidor 1 (Rep1).

Ubicación en Coordenas (Lat, Lon)	Rep1	-8.951677, -77.815207
	Rep2	-8.93299, -77.655569
Rep1 – Rep2	Señal recibida	-74 dBm
	Estimación de la velocidad de transmisión	42.2 Mbps
	Distancia de conexión	12.06 km

Tabla 3.23: Parametros de conexión PtP del enlace entre la repetidor 1 y 2 (Rep1 y Rep2).

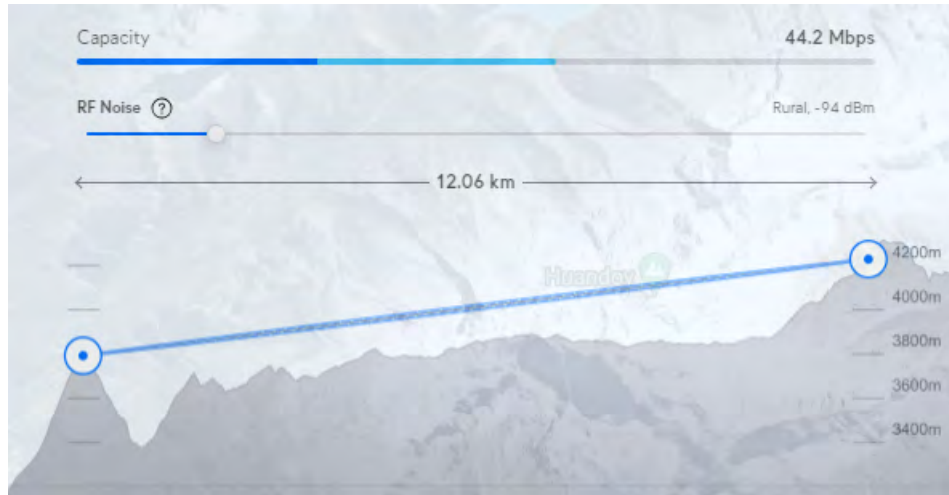


Figura 3.27: Perfil de conexión, del segundo tramo de la red de transporte, entre la repetidor 1 y 2 (Rep1 y Rep2).

Ubicación en Coordenadas (Lat, Lon)	Rep2	-8.93299, -77.655569
	Rep3	-8.910093, -77.621542
Rep2 – Rep3	Señal recibida	-66 dBm
	Estimación de la velocidad de transmisión	55.3 Mbps
	Distancia de conexión	4.53 km

Tabla 3.24: Parametros y resultados de conexión PtP del enlace entre la repetidor 2 y 3 (Rep2 y Rep3).

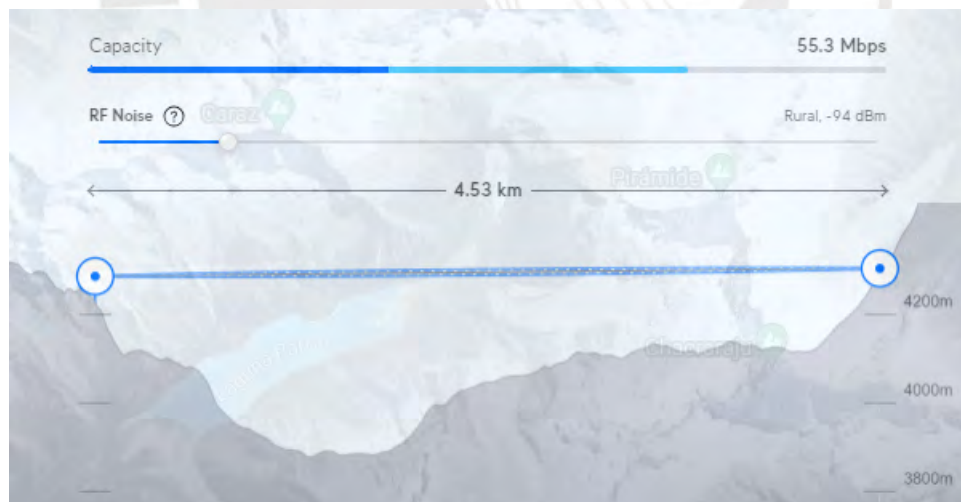


Figura 3.28: Perfil de conexión, del tercer tramo de la red de transporte, entre la repetidor 2 y 3 (Rep2 y Rep3).

Ubicación en Coordenas (Lat, Lon)	Rep3 Final	-8.910093, -77.621542
Rep3 – Final	Señal recibida	-63 dBm
	Estimación de la velocidad de transmisión	55.3 Mbps
	Distancia de conexión	3.28 km

Tabla 3.25: Parametros y resultados de conexión PtP del enlace entre la repetidor 3 y final (Rep3 y Final).

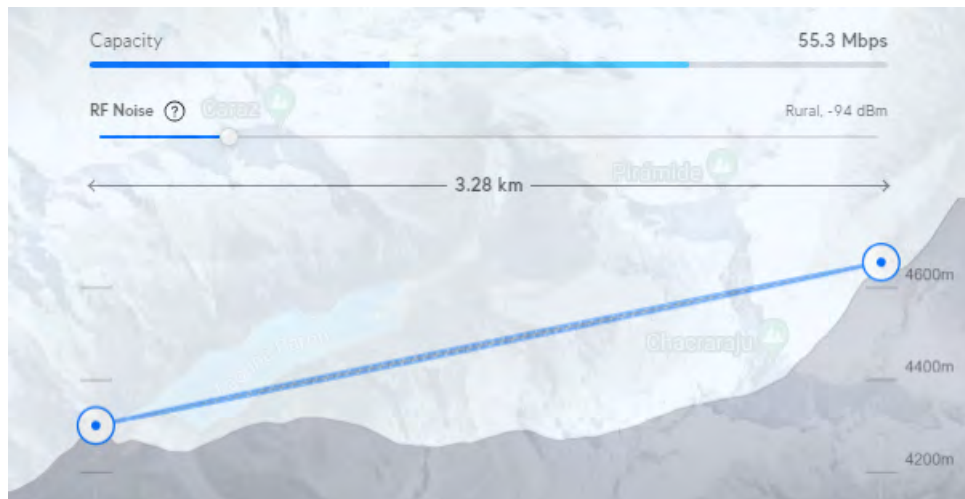


Figura 3.29: Perfil de conexión, del tramo final de la red de transporte, entre la repetidor 3 y el nodo final (Rep3 y Final).

Con el segmento de conexión PtP de la red WIFI se tendría una capacidad máxima de transporte de datos de 42.2 Mbps, el cual se podría ampliar si se configura un ancho de canal mayor como 20/30/40 MHz.

La conexión entre nodo Final del segmento WIFI y el Gateway LPWAN se articularía mediante una conexión física Ethernet empleando el protocolo TCP/IP tal como se muestra en el siguiente diagrama.

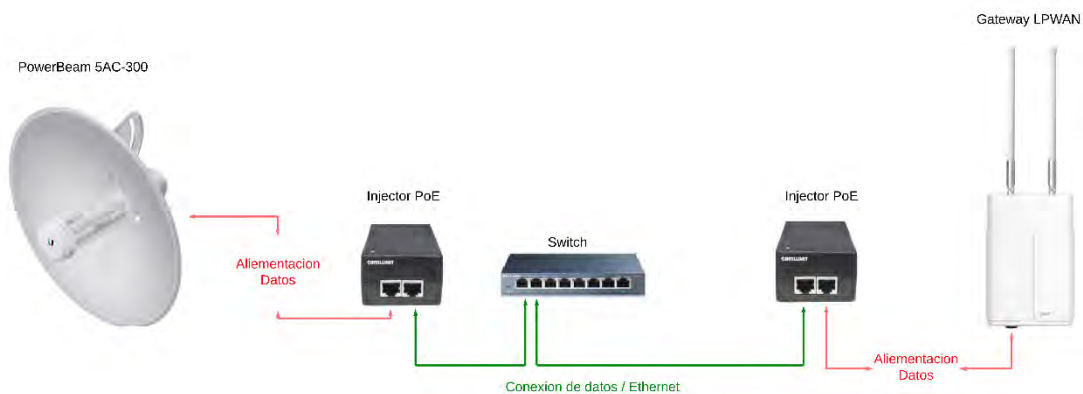


Figura 3.30: Conexión física entre el nodo final de la red WIFI y el gateway LPWAN.

3.9. Diseño de la red M2M-IoT Satelital

La red satelital M2M-IoT se estructura en tres segmentos principales. El primero, el segmento de sensores, implica la conexión de los sensores ambientales (SNEA, SDM, SM) a transmisores satelitales. El segundo, el segmento satelital, consiste en una constelación de satélites M2M-IoT que reciben datos de los sensores. Finalmente, el segmento de control de operaciones terrestres incluye una estación base satelital encargada de recoger los datos de los satélites para su posterior envío a un centro de datos, donde se almacenan y publican.

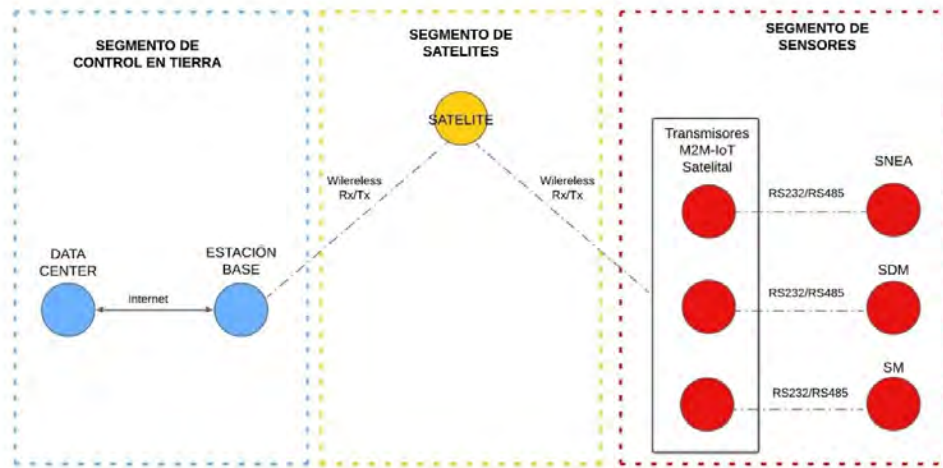


Figura 3.31: Topología básica de la red satelital M2M-IoT.

En el segmento de sensores (línea roja), se observa que cada sensor ambiental se conecta directamente a un transmisor satelital, luego de ello, cada transmisor envía los datos al segmento de satélites (línea amarilla), posteriormente estos datos se reenvían a una estación base en tierra (línea celeste), donde se almacenan y gestionan. El usuario solo tiene control sobre segmento de sensores y específicamente sobre la configuración de los transmisores satelitales M2N-IoT.

3.9.1. Ubicación del Gateway M2M-IoT Satelital

El gateway M2M-IoT funciona como un enlace de comunicación satelital. Tal como se expone en el marco teórico, existen varios servicios especializados que ofrecen conectividad satelital bajo la denominación comercial "M2M-IoT Satelital". En este estudio se ha seleccionado el servicio IsatDataPro, comercializado por las empresas Inmarsat y Orbcomm, debido a sus ventajas técnicas. Entre ellas destacan la compatibilidad con sensores tanto analógicos como digitales, su bajo consumo energético y un soporte técnico robusto [Orbcomm, 2024].

Este servicio está diseñado para cubrir la necesidad de transmisión y recepción de pequeñas cantidades de datos generados por activos diversos, como maquinaria, sensores, aviones, entre otros. Actualmente, IsatDataPro ofrece una cobertura global, con excepción de las regiones polares extremas. Inmarsat cuenta con cinco satélites dedicados a este servicio, cada uno cubriendo diferentes áreas geográficas del mundo. En particular, los satélites I-3 F5 e I-4 F3 proporcionan cobertura a la región de América.

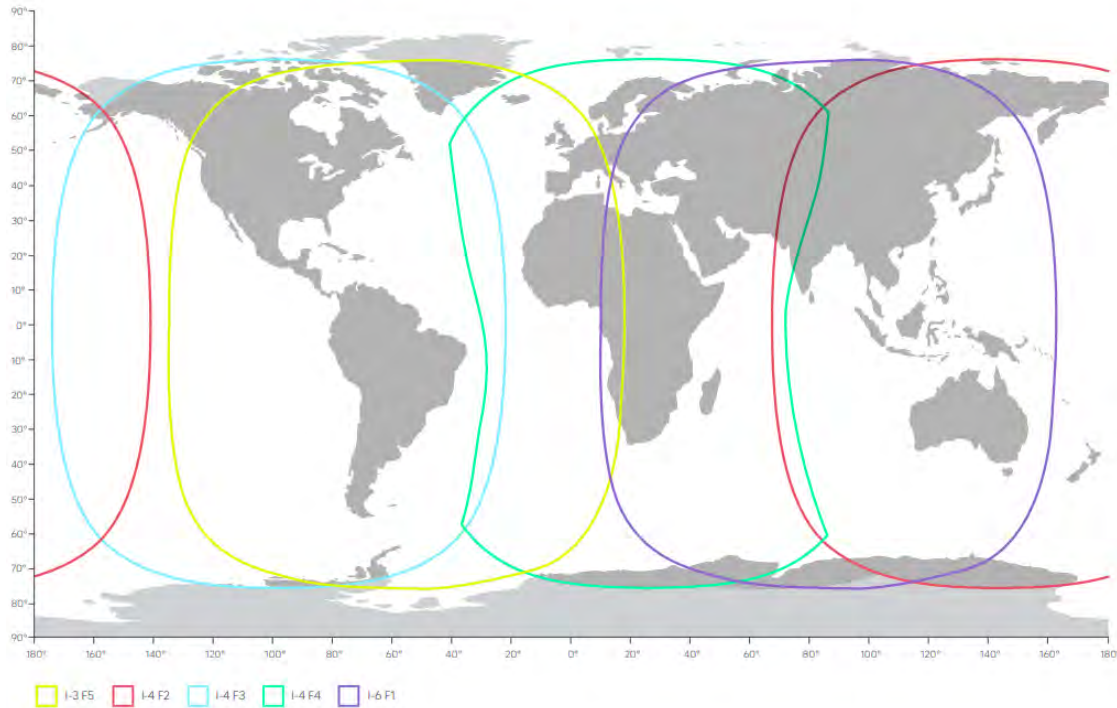


Figura 3.32: Cobertura satelital del servicio IsatDataPro. Los satélites que cubren la zona de estudio son I-3 F5 y I-4 F3. Fuente: Inmarsat Coverage IsatDat Pro.

El satélite I-3 F5, lanzado en 1998, y el I-4 F3, en 2008, están en un proceso de transición, donde algunos servicios del I-3 F5 se están migrando al I-4 F3. A pesar de que el I-3 F5 ha superado su vida útil estimada de más de 25 años, aún se consideran su posición orbital y la del I-4 F3 para la planificación de cobertura M2M IoT.

Cada satélite ocupa una posición orbital única, denominada 'longitud orbital' o 'posición en el arco geostacionario', medida en grados al este o al oeste del meridiano de Greenwich. Los satélites Inmarsat, siendo geostacionarios, se mantienen a una latitud cercana a 0°. Por lo tanto, la ubicación de estos satélites varía únicamente en términos de su longitud. Para el caso de los satélites, I-3 F5 e I-4 F3 ambos se posicionan a 54° Este y 98° Este respectivamente, estas son posiciones referenciales, para obtener una posición más precisa se utilizó los sistemas en línea de seguimiento de satélites: n2yo.com y satflare.com, estos obtienen y publican la posición exacta que envían constantemente los satélites a la tierra.

Para los cálculos posteriores, se considera únicamente las especificaciones técnicas del satélite Inmarsat I-4 F3, debido a su menor antigüedad en comparación con el satélite Inmarsat I-3 F5.

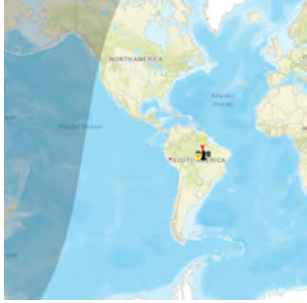

Característica	Inmarsat I-3 F5	Inmarsat I-4 F3
Latitud	-7.77	-3.63
Longitud	-53.99	-98.06
Altitud (km)	35,767.1	35,778.9
Posicionamiento visual		
Referencia	n2yo.com satflare.com	n2yo.com satflare.com

Tabla 3.26: Posición orbital de los satelites Inmarsat I-3 F5 Inmarsat I-4 F3.

3.9.2. Cálculo de la cobertura del M2M-IoT Satelital

Para determinar el área de cobertura de un satélite se utilizan los footprints o huellas de cobertura, que representan las zonas de la superficie terrestre que el satélite puede alcanzar desde su órbita. Utilizando la plataforma SatBeams, se evaluó la cobertura del satélite Inmarsat I-4 F3, arrojando un valor promedio de 2 dBW EIRP en la región de Perú, lo que indica una potencia radiada efectiva modesta. Esto implica que la intensidad de la señal recibida en el suelo no es particularmente alta en comparación con satélites de banda ancha que pueden emitir hasta 40 dBW EIRP [Wang et al., 2022b]. Para captar adecuadamente esta señal, las estaciones receptoras en tierra, como antenas o terminales, deberán estar ubicadas en áreas con mínimas interferencias o bloqueos, lo cual es común en entornos montañosos. Además, el valor de 2 dBW EIRP sugiere que la cobertura del satélite está orientada a servicios de baja velocidad de datos, como mensajería, rastreo o comunicaciones simples, lo que es coherente con aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT).



Figura 3.33: Cobertura satelital de Inmarsat I-4 F3 sobre la posición geográfica del Perú. Fuente: satbeams.com

El análisis anterior se complementó con una estimación más específica que permitió identificar obstáculos, como montañas o pendientes, que podrían obstruir la línea de visión entre un terminal terrestre y el satélite en órbita. Se utilizó la herramienta DishPointer, que calcula, de manera gráfica, la línea de vista entre el emisor y receptor. Los resultados obtenidos muestran que la ubicación de los sensores no presentan una obstrucción significativa.

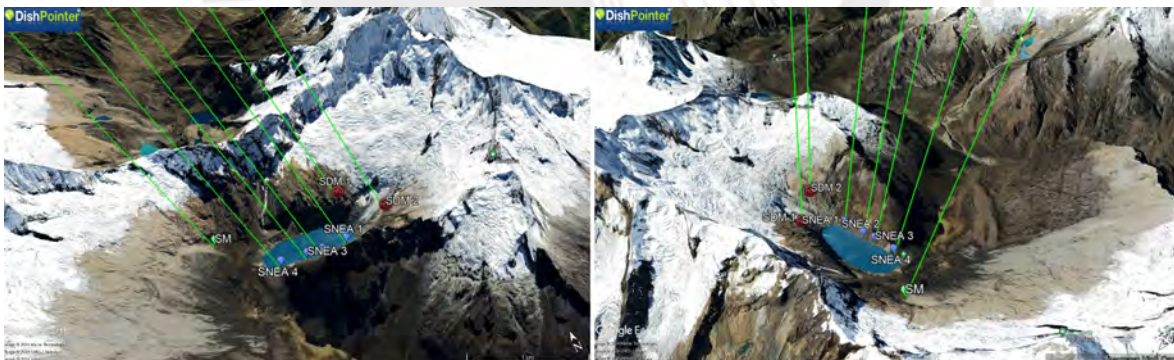


Figura 3.34: Estimación de línea de vista de los terminales satelitales ubicados en la posición de los sensores ambientales. Ambas imágenes muestran la zona de estudio desde diferentes ángulos. Las líneas verdes describen el enlace de cada sensor con el satélite Inmarsat I-4 F3.

3.9.3. Características técnicas del transmisor/receptor Satelital M2M-IoT

Para el análisis comunicación satelital, se utiliza el transmisor terrestre ST6100 de Orbcomm, que sirve para enviar y recibir pequeñas porciones de datos al satélite Inmarsat

I-4 F3. El transmisor envía datos a intervalos ajustables, con un límite de 6,400 bytes por transmisión y capacidad de recibir hasta 10,000 bytes desde el satélite. Estos terminales requieren un plan de datos mensual, los planes pueden variar entre 150k y 200k bytes al mes. Es decir, se espera que los datos enviados y recibidos por el terminal no sobrepasen los límites mensuales.

Características	Detalle técnico
Comunicación satelital	Payload Tx: 6400 bytes
	Payload Rx: 10000 bytes
	Latencia: 15 s, 100 bytes
	Frecuencia Rx: 1518.0 - 1559.0 MHz
	Frecuencia Tx: 1626.5 - 1660.5 MHz
	1668.0 - 1675.0 MHz
	EIRP: <7.0 dBW
Rastreo de posicionamiento	GPS/Glonass/Beidou/Galileo
Datos eléctricos	Input voltage: 9 to 32V
	Consumo de energía (Promedio a @12V DC, 22°C):
	Rx: 65 mA
	Tx: 0.65A
	Rx GPS/Glonass/Beidou: 22 Ma
	Sleep: 100 μ A
Interfases	Inputs/outputs: 4 analog or digital in/out
	Serial: RS-232, RS-485
Grado de protección	IP67
Temperatura de operación	-40° C hasta 85°C

Tabla 3.27: Características técnicas del terminal ST6100 de Orbcomm.

3.9.4. Cálculo de la potencia de recepción satelital

El Satelite I-4 F3 está equipado con 228 Narrow Spotbeams, 19 Wide Spots y 1 Global Beam. Un Wide Spot del satélite abarca extensas áreas geográficas del planeta, mientras que los Narrow Spotbeams se concentran en áreas más pequeñas con un rango de frecuencia específico.

El procedimiento para conectar terminales como el ST6100 a la red satelital es similar al de los terminales satelitales BGAN, este proceso incluye dos pasos principales [Control-Ground, 2022]. El primer paso es registrar el terminal en la red satelital mediante una conexión de Wide Spot con uno de los satélites I-4. Tras este registro, el segundo paso inicia, activando los servicios de telefonía y mensajería SMS, permitiendo realizar o recibir llamadas de voz y mensajes SMS globalmente.

Luego de ello, se establece una sesión de datos de alta velocidad a través de un Narrow Beam del satélite I-4 F3, optimizado para conexiones de banda ancha. Sin embargo, los terminales ST6100 no necesitan altas tasas de transmisión de datos. Su uso se restringe a los Wide Spots del satélite I-4 F3, que sirven principalmente para funciones de señalización y transmisiones de cantidades pequeñas de datos, esto es coherente con los valores obtenidos en el sección 3.9.2, donde se tiene un valor medio de EIRP 2 dBW, además se debe recordar que a mayor EIRP mayor potencia recibida y consecuentemente mayor tasa de velocidad.

3.9.5. Estimación de la Pérdida de Trayectoria Libre (FSPL)

Para estimar y caracterizar los niveles de señal satelital entre los terminales en tierra y el satélite Inmarsat I-4 F3, se utilizó información técnica referencial disponible en la literatura. Las características técnicas completas de las antenas emisoras y receptoras no están disponibles, tanto del satélite mencionado como del terminal ST6100, debido principalmente a secretos comerciales o propiedad intelectual de los operadores de satélite.

Se estimó la Pérdida de Trayectoria Libre (FSPL) mediante el modelo de Friis que sirve para predecir la pérdida de intensidad de la señal en el espacio libre sin obstáculos que pueda causar reflexión, difracción o dispersión. Este modelo es ampliamente usado en las conexiones satelitales, donde no existen obstáculos intermedios entre el emisor y receptor. La ecuación para el FSPL es la siguiente:

$$FSPL(\text{dB}) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (3.2)$$

Donde:

d es la distancia entre el transmisor y el receptor en metros.

f es la frecuencia de la señal en Hertz.

c es la velocidad de la luz en el vacío ($\approx 3 \times 10^8$ metros/segundo).

Una versión simplificada de la ecuación que asume que la frecuencia está en gigahertz (GHz) y la distancia en kilómetros (km), y que utiliza el valor de la velocidad de la luz en unidades acordes es la siguiente:

$$FSPL(\text{dB}) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 92,45 \quad (3.3)$$

Tomando en cuenta la ubicación de los sensores (ver 3.6.5) y la altitud del satélite Inmarsat I-4 F3, situado a 35,778.9 km de la tierra. Además, considerando que la frecuencia transmisión de la señal del equipo ST6100 es de 1626.5 - 1660.5 MHz 1668.0 - 1675.0 MHz se obtienen los siguientes datos:

- Distancia entre los sensores ubicación y el satélite: 35,778.9 km
- Frecuencia de la señal: 16 GHz (Banda Ku)

Reemplazando valores en la ecuación **3.3** se tiene:

$$FSPL(\text{dB}) = 207,6 \quad (3.4)$$

La Pérdida de Trayectoria Libre (FSPL) para un enlace satelital con una distancia de 35,778.9 km y una frecuencia de 16 GHz es aproximadamente 207.6 dB. Este valor se interpreta como una medida de cuánta señal se pierde por la propagación de la señal a través del espacio libre, sin considerar ningún otro tipo de atenuación como la lluvia, la atmósfera, o interferencias. Es un valor muy alto debido a la gran distancia a la que órbita el satélite Inmarsat I-4 F3 y la alta frecuencia utilizada (Banda Ku).

En base a este valor, se estima la potencia de recepción en el satélite Inmarsat I-4 F3 aplicando la siguiente ecuación de balance de enlace:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p - L_o \quad (3.5)$$

Donde:

- P_r es la potencia de recepción (en dBm o dBW).
- P_t es la potencia de transmisión (en dBm o dBW).
- G_t es la ganancia de la antena transmisora (en dBi).
- G_r es la ganancia de la antena receptora (en dBi).
- L_p es la pérdida de trayectoria libre, que acabamos de calcular (en dB).
- L_o son las otras pérdidas que pueden estar presentes en el sistema, como pérdidas en los cables, conectores, o atenuación atmosférica (en dB).

La potencia de recepción efectiva (P_r) que se calcula es el valor de recepción en el satélite Inmarsat I-4 F3, luego de que las estaciones en tierra (sensores ambientales) transmitan datos al satélite.

La potencia de transmisión (P_t) no se especifica explícitamente en las especificaciones técnicas del terminal ST6100, sin embargo, se tiene la potencia de transmisión del dispositivo, expresada como Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP), el cual es menor de 7.0 dBW.

La EIRP es una medida de la potencia de transmisión que toma en cuenta la ganancia de la antena y la potencia de salida del transmisor, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$\text{EIRP (dBW)} = \text{Potencia de transmisor (dBW)} + \text{Ganancia de antena (dBi)} - \text{Pérdida de línea (dB)}$$

Para convertir dBW a dBm se utiliza la siguiente relación:

$$1 \text{ W} = 1000 \text{ mW}$$

$$\text{dBm} = 10 \cdot \log_{10}(\text{Potencia en mW})$$

$$\text{dBW} = 10 \cdot \log_{10}(\text{Potencia en W})$$

$$\text{dBm} = \text{dBW} + 30$$

Si convertimos el valor EIRP de 7 dBW del terminal ST6100 a unidades dBm:

$$7 \text{ dBW} + 30 = 37 \text{ dBm}$$

Para efectos del cálculo, se asume que este valor corresponde a la potencia de transmisión del terminal ST6100:

$$P_t = 37 \text{ dBm}$$

La ganancia de la antena interna del terminal ST6100 no se describen explícitamente en las especificaciones técnicas, sin embargo, tomando como referencia las instrucciones para la instalación, configuración y uso de los scripts de Requisitos de Prueba Obligatorios de la Capa Física de IsatData Pro se estima una ganancia de la antena transmisora G_t en -2 dBi.

$$G_t = -2 \text{ dBi}$$

El valor de la ganancia de la antena receptora del satelital (G_r) se considera un valor de 60 dBi. En base a los diseños típicos de antenas para sistemas de comunicación satelital [Cimadevilla, 2018].

$$G_r = 60 \text{ dBi}$$

El valor de la pérdida de trayectoria libre (L_p) se calculó previamente en FSPL (dB) = 207.6, por ende:

$$L_p = 207,6 \text{ dB}$$

Como pérdidas del sistema (L_o) se consideran los efectos de la atenuación atmosférica. La atenuación atmosférica varía dependiendo de la frecuencia de la señal, la longitud del trayecto de la señal a través de la atmósfera y las condiciones atmosféricas (como la lluvia, la niebla o el vapor de agua). Por ejemplo, en la banda Ku (12-18 GHz), la atenuación atmosférica puede ser de alrededor de 0.1 dB a 0.2 dB en condiciones normales, pero puede aumentar hasta 10 dB o más durante fuertes lluvias, tal como describe en el estudio de [Espinosa Giralt, 2023].

Teniendo en cuenta que la zona de estudio se caracteriza por la presencia de lluvias frecuentes, para efectos del cálculo se considera el valor de 10 dB para L_o , por ende:

$$L_o = 10 \text{ dB}$$

Reemplazando todos los valores en la ecuación de potencia de recepción 3.5 se tiene:

$$P_r = 37 + (-2) + 60 - 207,6 - 10$$

$$P_r = -122,6 \text{ dBm}$$

Este resultado se puede interpretar de la siguiente manera. Cada sensor ambiental conectado transmitirá datos a través del transmisor ST 6100 directamente al satélite Inmarsat I4 F3, que los recibirá con una potencia de -122.6 dBm. Dado que en los sistemas satelitales los umbrales de recepción suelen rondar los -160 dBm o incluso valores inferiores, dependiendo de la tecnología y las condiciones ambientales [Zamora-Maciel, 2018], una señal de -122.6 dBm supera dicho umbral. Esto sugiere que el Inmarsat I4 F3 podrá procesar la señal de manera efectiva.

Cálculo de la disponibilidad del enlace satelital

Para el cálculo de la disponibilidad del enlace satelital, asumimos que la potencia de la señal recibida en el satélite es de -122.6 dBm para todos los sensores (SNEA, SM, SDM). Luego, en referencia a la sensibilidad estimada del satélite en -160 dBm [Zamora-Maciel, 2018] se obtiene el margen de enlace (FM).

$$FM = P_{rxs} - \text{Sensibilidad-Satelite},$$

donde P_{rxs} es la potencia recibida en el satélite en dBm.

Para un valor de Sensibilidad del Satelite de -160 dBm se tiene:

$$FM = -122,6 - (-160)$$

$$FM = 37,4 \text{ dB}$$

Luego, si X representa la variabilidad lenta o *shadowing* del canal (en dB), se asume que $X \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$, y la probabilidad de que, debido a la variación, la señal se reduzca por debajo de la sensibilidad (es decir, ocurra un “outage”) es

$$P_{\text{outage}} = \Pr \{X > FM\} = Q\left(\frac{FM}{\sigma}\right),$$

donde $Q(x)$ es la función cola de la distribución normal estándar:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt.$$

Finalmente, la disponibilidad sería:

$$\text{Disponibilidad Satelital} = 1 - P_{\text{outage}}.$$

Las siguientes tablas muestran los resultados de la probabilidad de *outage* y la disponibilidad del sistema para cada sensor en los tres modelos de propagación: ITU-R P1546, COST231-Hata y Okumura-Hata, asumiendo una desviación estándar del canal $\sigma = 10$.

$$P_{\text{outage}} = Q(\text{FM}/\sigma)$$

$$P_{\text{outage}} = Q(37,4/10) = Q(3,74) = 9,201e - 05$$

$$\text{Disponibilidad Satelital} = 1 - 9,201e - 05.$$

$$\text{Disponibilidad Satelital} = 99,9\%$$

Mediante el modelo de FSPL, se determinó que el enlace satelital presenta un alto rendimiento, alcanzando una disponibilidad del 99,9%. En este escenario, donde cada sensor estaría equipado con un transmisor M2M-IoT satelital independiente (Tabla 3.27), la disponibilidad sería homogénea para todos los dispositivos. No obstante, este valor podría degradarse si la variabilidad del canal supera los 10 dB.

3.9.6. Cálculo relación señal ruido (SNR) en el segmento M2M-IoT Satelital

Para calcular el valor del SNR se utilizó el valor del ruido de fondo estimado en -123 dBm a 125 kHz (Figura 3.22). Además, se utilizó el valor -122.6 dBm de la potencia de recepción P_r , calculado en la sección anterior. Reemplazando estos valores en la siguiente ecuación:

$$SNR(dB) = PS(dBm) - PN(dBm)$$

Donde:

- SNR es la relación señal ruido (en dB).
- PS es la potencia de la señal útil recibida (en dBm).
- PN es la potencia del ruido de fondo (en dBm).

$$SNR(dB) = -122,6 - (-123)$$

$$SNR = 0,4 \text{ dB}$$

El valor del SNR en 0.4 dB se estimó teniendo en cuenta unas pérdidas por atenuación atmosférica de 10 dB (Ver sección anterior, valor de L_o), apropiadas para condiciones de fuertes precipitaciones. No obstante, al variar este valor de pérdida por atenuación

atmosférica en un rango de 0 dB a 10 dB —donde 0 dB corresponde a condiciones sin precipitaciones y 10 dB a condiciones de intensas lluvias—, se obtienen la siguiente tendencia:

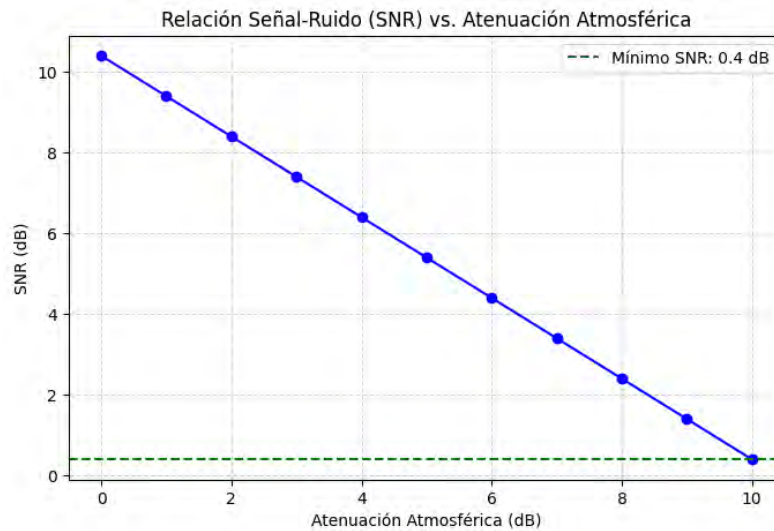


Figura 3.35: Variación de la relación señal ruido (SNR) en la ecuación SNR, donde L_o representa las pérdidas por atenuación atmosférica que varían de 0 a 10 dB. La línea azul representa cómo cambia el SNR a medida que aumenta la atenuación atmosférica.

Podemos observar que el SNR decrece linealmente con el aumento de la atenuación atmosférica. Esto tiene sentido ya que a medida que la atenuación aumenta, más señal se pierde debido a la absorción y dispersión causadas por la atmósfera, lo que resulta en un SNR más bajo.

bajo es un indicador de la calidad limitada de señal en el enlace satelital, lo cual es coherente con las tasas limitadas de envío de datos que ofrece el terminal ST6100 de Orbcomm (Tabla 3.27).

3.9.7. Oferta de la velocidad de transmisión de datos M2M-IoT Satelital

La velocidad de transmisión de datos del segmento satelital se calculó mediante el teorema de Shannon-Hartley, ecuación 3.1. En la literatura no se encuentra disponible el ancho de banda de operación del terminal satelital ST6100; por ello, para efectos del cálculo y para homogenizar la comparación con la tecnología LoRa de LPWAN, se consideró el valor de 125 kHz. Además, también se utiliza el valor mínimo del SNR = 0.4 dB, variando este valor hasta un máximo de 10 dB. Los resultados se muestran en la Figura 3.36.

En condiciones atmosféricas despejadas o con pocas lluvias, se pueden alcanzar valores de SNR hasta 10 dB. Esto permitiría obtener tasas de velocidad de hasta 432.4 kbps con un ancho de banda de 125 kHz. Por otro lado, en condiciones más desfavorables con valores negativos de SNR= 0.4 dB, las velocidades alcanzables se reducen a aproximadamente 133.5 kbps con el mismo ancho de banda.

Un SNR positivo indica que la señal tiene una calidad lo suficientemente alta como para permitir velocidades de transmisión relativamente rápidas, optimizando así la eficiencia del canal. Aunque un SNR de 10 dB es considerado moderadamente bajo, la implementación de técnicas avanzadas como la corrección de errores y la modulación adecuada puede garantizar una transmisión estable.

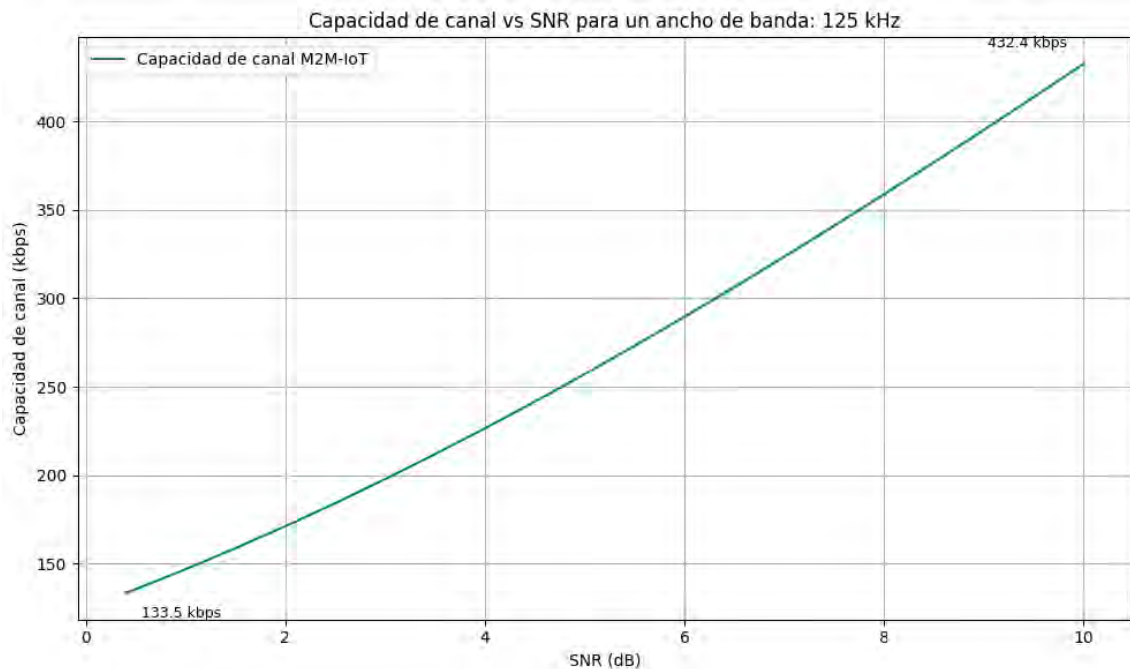


Figura 3.36: Variación de velocidad de transmisión satelital (capacidad de canal) en función de un SNR variable.

3.10. Estimación de la provisión energética

3.10.1. Equipos

El conjunto de equipos electrónicos se divide en tres clases: sensores, registradores y transmisores.

Sensores

El estudio analiza tres tipos de sensores: el sensor de presión OTT RLS, empleado para medir el nivel del espejo de agua (SNEA); el sensor de cuerda vibrante SenSpot, diseñado para detectar deslizamientos de masa (SDM); y un conjunto de sensores meteorológicos, que registran las condiciones climáticas (SM). Los sensores operan en modo de Corriente Continua y tienen diferentes tasas de consumo expresada en miliamperios (mA), tal como se observa en la siguiente tabla:

Equipo	Voltaje (V)	Consumo (mA)	Modo de Operación
OTT RLS (SNEA)	12	3.6	Continuo
SenSpot (SDM)	12	5	Continuo
Sensores Meteorológicos (SM)	12	20	Continuo

Tabla 3.28: Estimación del voltaje y consumo eléctrico de los sensores ambientales.

Registrador

El registrador de datos CR1000X es el dispositivo electrónico encargado de suministrar energía eléctrica a los sensores y de gestionar los datos, recibiendo, almacenando y transmitiendo las mediciones registradas. Este equipo opera en modo de corriente continua y, según el fabricante (Campbell Scientific), tiene un consumo energético promedio de 55 mA en modo activo. En cuanto al modo de operación, el registrador estaría configurado para enviar un mensaje cada minuto como mínimo.

Equipo	Voltaje (V)	Consumo (mA)	Modo de Operación
CR1000X	12	3.5 mA (standby), 55 mA (activo)	Wake-up cada 1 min

Tabla 3.29: Estimación del voltaje y consumo eléctrico del registrador de datos.

Transmisores

Se evaluaron dos tipos de transmisores: el UC501-915M LoRa para redes LPWAN y el ST6100 para redes M2M-IoT satelitales. El consumo de corriente del UC501-915M no está especificado en el *datasheet* del fabricante, por ello se utiliza un consumo de referencia de 120 mA calculado en el estudio de [Casals et al., 2017]. En contraste, el consumo del ST6100 se obtuvo directamente del *datasheet* de Orbcomm. Ambos dispositivos operan con alimentación de corriente continua (5 V y 12 V). Estos dispositivos también tienen un consumo pasivo en modo *standby*, sin embargo, es tan pequeño que alcanza la escala de los microamperios, por ende no se considera en los cálculos siguientes.

Se estimó un tiempo de transmisión arbitrario (t_{TX}) en segundos. Este valor representa el tiempo de duración de la transmisión. Considerando que la distancia entre el gateway y los sensores LPWAN es menor que la distancia satélite-sensores, se estima un tiempo de transferencia menor para el transmisor LPWAN. La frecuencia de envío de datos se estima con un mensaje mínimo por minuto.

Modelo	Voltaje (V)	Consumo	TX (seg)	Frecuencia
UC501-915M (LPWAN)	5	120 mA	2	Cada 1 min
ST6100 (M2M-IoT Satelital)	12	650 mA	10	Cada 1 min

Tabla 3.30: Estimación del voltaje y consumo eléctrico de los transmisores.

3.10.2. Cálculo del consumo energético diario

El método empleado para calcular el consumo energético diario de las sensores (SNEA, SDM, SM) se basa en la descomposición de los consumos individuales de cada componente: sensores, registradores (CR1000X) y transmisores (LPWAN o M2M-IoT Satelital). Para los sensores en modo continuo, se calcula su energía multiplicando voltaje, corriente durante 24 horas de operación. El registrador CR1000X, que opera en modo *standby* la mayor parte del tiempo (59 minutos por hora) y se activa brevemente (1 minuto), requiere un cálculo ponderado entre ambas corrientes. Los transmisores, que envían datos periódicamente (cada minuto), contribuyen según su potencia o corriente durante el tiempo de transmisión en segundos convertido a horas (t_{TX}), extrapolado a 1440 minutos diarios.

Para cada estación (SNEA, SDM, SM), el consumo diario total se calcula como:

$$E_{total} = E_{sensor} + E_{CR1000X} + E_{transmisor} \quad (3.6)$$

Donde:

- **Energía del sensor (continuo):**

$$E_{sensor} = V \times I_{sensor} \times 24 \text{ h} \quad (3.7)$$

- **Energía del CR1000X (standby + activo):**

$$E_{CR1000X} = V \times \left(I_{standby} \times \frac{59}{60} + I_{activo} \times \frac{1}{60} \right) \times 24 \text{ h} \quad (3.8)$$

- **Energía del transmisor (TX periódico):**

$$E_{Transmisor LPWAN} = V \times I_{TX} \times \frac{t_{TX}}{3600} \times 1440 \quad (\text{para LPWAN}) \quad (3.9)$$

$$E_{Transmisor Satelital} = V \times I_{TX} \times \frac{t_{TX}}{3600} \times 1440 \quad (\text{para IoT-M2M Satelital}) \quad (3.10)$$

Consumo diario SNEA

La estación de nivel de agua se conforma de tres equipos principales: El sensor de presión OTT RLS, el registrador de datos CR1000X y un transmisor, que puede ser de tipo LPWAN o M2M-IoT satelital. En la siguiente Figura 3.37 se muestra un modelo conceptual de las conexiones entre los equipos. Al ser una estación autónoma energéticamente, estaría provista por un sistema de paneles y baterías solares.

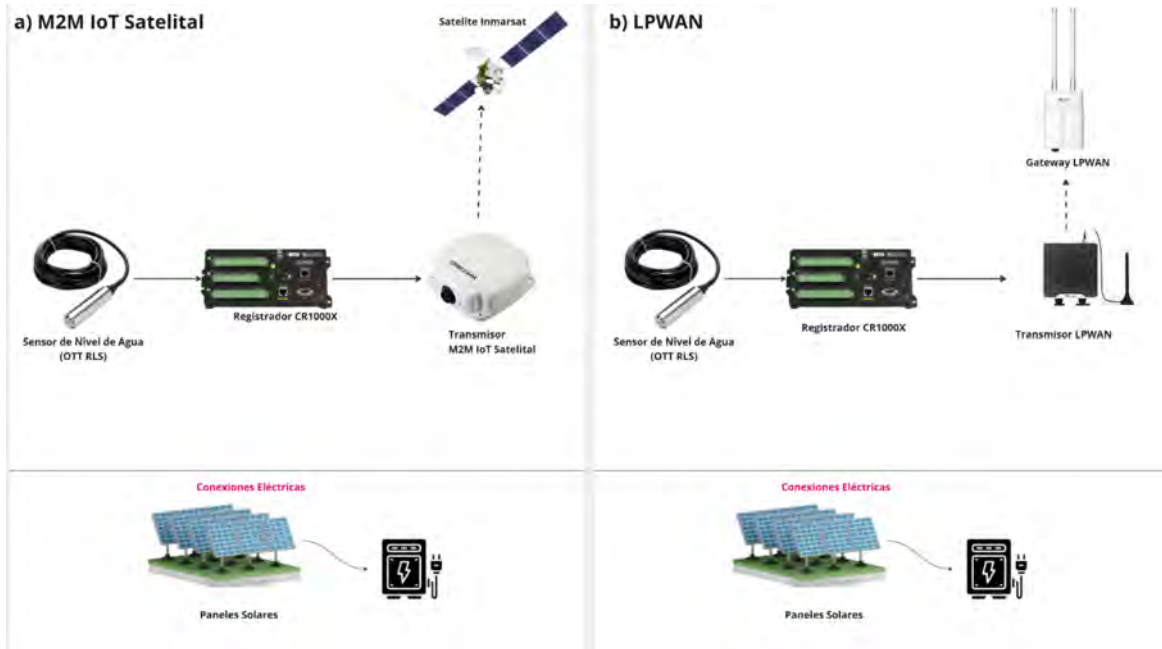


Figura 3.37: Modelo conceptual de conexiones del sensor de nivel de agua (SNEA). a) Diseño utilizando el transmisor M2M-IoT Satelital. b) Diseño utilizando el transmisor y Gateway LPWAN.

- **Consumo del sensor OTT RLS**

El sensor tendría un modo de funcionamiento continuo durante el día (24 horas).

$$12 \text{ V} \times 0,0036 \text{ A} \times 24 \text{ h} = 1,0368 \text{ Wh/día}$$

- **Consumo del registrador CR1000X**

El consumo de corriente del registrador se calculó como un promedio ponderado entre sus modos de operación: 3.5 mA en *standby* y 55 mA en modo activo. Dado que el equipo opera 59 minutos por hora en *standby* y solo 1 minuto en modo activo, el valor resultante refleja esta proporción temporal.

$$12 \text{ V} \times \left(0,0035 \text{ A} \times \frac{59}{60} + 0,055 \text{ A} \times \frac{1}{60} \right) \times 24 \text{ h} = 1,2552 \text{ Wh/día}$$

- **Consumo del Transmisor LPWAN**

Considerando que cada transmisión tendría una duración de 2 segundos, se calcula el consumo de cada transmisión expresado en horas (factor 1/3600). Luego para obtener el consumo diario, se multiplica por el número de transmisiones que se realizaran al día (1440).

$$12 \text{ V} \times 0,12 \text{ A} \times \frac{2}{3600} \times 1440 = 1,15 \text{ Wh/día}$$

- **Consumo del Transmisor M2M-IoT Satelital**

Para las transmisiones satelitales se considera un tiempo de transmisión de 10 segundos, se realiza la conversión a horas y se multiplica por el número de transmisiones a realizarse durante el día.

$$12 \text{ V} \times 0,65 \text{ A} \times \frac{10}{3600} \times 1440 = 31,2 \text{ Wh/día}$$

En el Tabla 3.31 se muestra el consumo total de los componentes que conforman el sensor SNEA. Se observa que el consumo energético diario de la red M2M-IoT Satelital es considerablemente mayor que la red LPWAN.

Componente	LPWAN	M2M-IoT Satelital
OTT RLS (Wh/día)	1,0368	1,0368
CR1000X (Wh/día)	1,2552	1,2552
Transmisor (Wh/día)	1.15	31.2
Total SNEA (Wh/día)	3.44	33.49

Tabla 3.31: Consumo energético diario por componente para cada tipo de red usando el sensor SNEA.

Consumo diario SDM

El cálculo de consumo diario para el sensor de deslizamiento de masas (SDM) se realiza de forma similar al consumo de SNEA. El registrador y los transmisores se mantienen igual. Sin embargo, para esta estación se utiliza el sensor SensSpot.

- **Consumo del sensor SensSpot**

$$12 \text{ V} \times 0,005 \text{ A} \times 24 \text{ h} = 1,44 \text{ Wh/día}$$

- **Consumo del registrador CR1000X**

$$12 \text{ V} \times \left(0,0035 \text{ A} \times \frac{59}{60} + 0,055 \text{ A} \times \frac{1}{60} \right) \times 24 \text{ h} = 1,2552 \text{ Wh/día}$$

- **Consumo del Transmisor LPWAN**

$$12 \text{ V} \times 0,12 \text{ A} \times \frac{2}{3600} \times 1440 = 1,15 \text{ Wh/día}$$

- **Consumo del Transmisor M2M-IoT Satelital**

$$12 \text{ V} \times 0,65 \text{ A} \times \frac{10}{3600} \times 1440 = 31,2 \text{ Wh/día}$$

El sensor SDM tiene un consumo ligeramente más alto que SNEA para ambas redes, sin embargo, el consumo del segmento satelital sigue siendo mayor elevado en comparación con LPWAN.

Componente	LPWAN	M2M-IoT Satelital
SenSpot (Wh/día)	1,44	1,44
CR1000X (Wh/día)	1,2552	1,2552
Transmisor (Wh/día)	1.15	31.2
Total SDM (Wh/día)	3.84	33.89

Tabla 3.32: Consumo energético diario por componente para cada tipo de red usando el sensor SDM.

Consumo diario SM

El consumo energético de los sensores meteorológicos (SM) se calcula de manera similar a los sensores anteriores. No obstante, esta estación presenta un consumo más elevado de corriente al tratarse de un conjunto mayor de sensores (temperatura, presión, radiación, etc) que se encontrarían conectados al registrador. El consumo del registrador y transmisores se mantiene igual a SNEA y SDM.

- **Consumo del sensores meteorológicos**

$$12 \text{ V} \times 0,02 \text{ A} \times 24 \text{ h} = 5,76 \text{ Wh/día}$$

- **Consumo del registrador CR1000X**

$$12 \text{ V} \times \left(0,0035 \text{ A} \times \frac{59}{60} + 0,055 \text{ A} \times \frac{1}{60} \right) \times 24 \text{ h} = 1,2552 \text{ Wh/día}$$

- **Consumo del Transmisor LPWAN**

$$12 \text{ V} \times 0,12 \text{ A} \times \frac{2}{3600} \times 1440 = 1,15 \text{ Wh/día}$$

- **Consumo del Transmisor M2M-IoT Satelital**

$$12 \text{ V} \times 0,65 \text{ A} \times \frac{10}{3600} \times 1440 = 31,2 \text{ Wh/día}$$

El consumo energético del sistema meteorológico (SM) alcanza 8.16 Wh/día, lo que representa aproximadamente 2.4 veces el consumo de los sistemas SNEA (3.44 Wh/día) y 2.1 veces el del sistema SDM (3.84 Wh/día). Por su parte, la red satelital mantiene su diferencia de consumo en comparación con LPWAN.

Componente	LPWAN	M2M-IoT Satelital
Sensores Meteorológicos (Wh/día)	5.76	5.76
CR1000X (Wh/día)	1,2552	1,2552
Transmisor (Wh/día)	1.15	31.2
Total SM (Wh/día)	8.16	38.21

Tabla 3.33: Consumo energético diario por componente para cada tipo de red usando el sensor SM.

3.10.3. Dimensionamiento de baterías y paneles solares

Para dimensionar los sistemas de energía (baterías y paneles solares) requeridos por las redes LPWAN y M2M-IoT Satelital, se emplearon dos metodologías estandarizadas: (3.11) el cálculo de capacidad mínima de baterías, basado en la norma IEC 61427, que considera la demanda energética diaria, profundidad de descarga y autonomía; y (3.12) la determinación de potencia nominal fotovoltaica mediante la Guía IEEE 1562, la cual compensa los consumos diarios, pérdidas del sistema (eficiencia, irradiación local y días de autonomía)

$$C_{\text{batería}}(Wh) = \frac{E_{\text{diaria}} \times D_{\text{autonomía}}}{DoD} \quad (3.11)$$

Donde:

E_{diaria} : Consumo energético diario (Wh/día).

$D_{\text{autonomía}}$: Días de autonomía.

DoD Profundidad de descarga.

$$P_{\text{panel}}(W) = \frac{E_{\text{diaria}}}{\text{Horas de Sol Pico} \times \eta} \quad (3.12)$$

$\eta = 0,2$ (pérdidas del 80%).

Cálculo de baterías

El siguiente tabla se muestra el consumo energético diario (E_{diaria}) calculado en la sección anterior por tipo de sensor y tipo de red.

Sensor	LPWAN (Wh/día)	M2M-IoT Satelital (Wh/día)
SNEA	3.44	33.49
SDM	3.84	33.89
SM	8.16	38.21

Tabla 3.34: Consumo energético diario por tipo de red para cada sensor.

Considerando 3 días de autonomía ($D_{\text{autonomía}} = 3$), es decir el número de días que el sistema puede seguir suministrando energía sin recarga, incluso en ausencia de luz solar. Además, la profundidad de descarga (DoD) de una batería se encuentra entre el 50 % y el 70 %, en base a ello, se consideró el valor medio $DoD = 60\%$. Aplicando la ecuación 3.11 sobre los datos de la Tabla 3.34 se obtienen los siguientes resultados:

Para la red LPWAN, los sensores SNEA y SDM requieren 17.2 Wh y 19.2 Wh respectivamente, cubiertos con baterías de 20 Wh cada uno, mientras el sensor SM necesita 48.8 Wh, que se cubre con una batería de 50 Wh. En contraste, la red M2M-IoT satelital requiere capacidades significativamente mayores: 170 Wh para SNEA/SDM y 200 Wh para SM, reflejando la mayor demanda energética de esta tecnología.

El consumo de los sensores LPWAN representa apenas el 10 % (SNEA), 11 % (SDM) y 21 % (SM) respecto a sus equivalentes satelitales. En general, la energía requerida por la red LPWAN equivale al 14.6 % del consumo total de la red M2M-IoT satelital.

Sensor	LPWAN (Wh/día)	M2M-IoT Satelital (Wh/día)	Capacidad mínima batería LPWAN (Wh)	Capacidad mínima batería Satelital (Wh)
SNEA	3.44	33.49	17.2	167.45
SDM	3.84	33.89	19.2	169.45
SM	8.16	38.21	40.8	191.05

Tabla 3.35: Capacidad de batería requerida para 3 días de autonomía y una profundidad de descarga (DoD) del 60 %.

Cálculo de paneles solares

Considerando un factor de eficiencia de paneles solares del 20 %, 4 horas de sol pico y utilizando el consumo de energía día obtenido en los equipos (Tabla 3.34). En base a la ecuación (3.12), se obtienen los siguientes resultados:

Los resultados muestran que, para la red LPWAN, el sensor SNEA requiere un panel solar con una generación mínima de potencia de 4.3 W. De manera similar, para los sensores SDM y SM se obtienen valores de 4.8 W y 10.2 W, respectivamente. La red

LPWAN requiere potencias relativamente bajas; además, este bajo requerimiento se traduce en un menor tamaño de los paneles solares.

Por su parte, la red M2M-IoT satelital requiere potencias de generación superiores a 40 W para todos los sensores evaluados.

Sensor	Panel LPWAN (W)	Panel Satelital (W)
SNEA	4.3	41.86
SDM	4.8	42.36
SM	10.2	47.76

Tabla 3.36: Capacidad mínima del panel solar para diferentes sensores y tipos de red, considerando 4 horas de sol pico y una eficiencia del 20 %.



Capítulo 4

Evaluación Económica

En el capítulo anterior se desarrollaron dos propuestas de redes inalámbricas para la transmisión de datos en entornos montañosos. La primera opción, una red WIFI-LPWAN, requiere una mayor inversión inicial debido a la necesidad de adquirir equipos de comunicación y eléctricos, además de construir infraestructura como repetidores y estaciones base, junto con la contratación de servicios de internet. Por otro lado, la segunda opción, la red M2M-IoT Satelital, presenta una inversión más baja, limitada a la compra de transmisores satelitales, la contratación de servicios fijos de conectividad y los servicios de configuración satelital.

Con base en estos diseños, se establecen los siguientes objetivos económicos del estudio:

Objetivo de la Red WIFI-LPWAN: Desarrollar una red de comunicación de bajo costo y fácil mantenimiento que permita el monitoreo en tiempo real del estado de la laguna Arhuaycocha, con el fin de prevenir riesgos para la población de la subcuenca del río Blanco Santa Cruz.

Objetivo de la Red M2M-IoT Satelital: Implementar una red satelital confiable y de amplia cobertura, asegurando la transmisión continua de datos sobre la laguna Arhuaycocha, minimizando la necesidad de infraestructura terrestre en zonas de alta montaña.

4.1. Identificación de costos

4.1.1. Costos iniciales

Los precios de los sensores, equipos de comunicación, dispositivos eléctricos y accesorios se obtuvieron a través de cotizaciones realizadas a redistribuidores nacionales de reconocidas marcas. Para los sensores ambientales, se consultaron precios de OTT Hydromet; para los registradores de datos, de Campbell Scientific; en cuanto a los equipos WiFi, se recurrió a Ubiquiti; para los equipos LPWAN, a Milesight; y finalmente, para los transmisores satelitales IoT, a Orbcomm.

Costos de la adquisición de sensores

El conjunto de sensores que se consideran son los siguientes: Cuatro Sensores de Nivel de Espejo de Agua (SNEA), dos Sensores de Deslizamiento de Masas (SDM) y un Sensor Meteorológico (SM) (véase sección 3.4). Cada sensor requiere un registrador de datos donde se almacenan los datos y se configuran las reglas de comunicación. Además, se incluyen los accesorios tanto eléctricos como de protección para cada sensor.

n.	Descripción	Costo Unitario (S/)	Cantidad	Sub Total (S/)
1	Sensor de Nivel de Espejo de Agua Marca: OTT HydroMet Modelo: OTT RLS	9,000.00	4	36,000.00
2	Sensor de Deslizamiento de Masas Marca: Resensys Modelo: Wireless Displacement-Crack Meter SenSpot	6,000.00	2	12,000.00
3	Registrador de datos Marca: Campbell Scientific Modelo: CR1000X	5,550.00	6	33,300.00
4	Accesorios (Cable, Gabinetes de Control, Componentes eléctricos, Baterías)	2,500.00	6	15,000.00
5	Estación Meteorológica - Marca: Campbell Scientific Registrador de datos - Modelo: CR1000X Sensor Temperatura y Humedad Modelo: HMP155A-L , Sensor Pluviometro Modelo: 52202-L Sensor Piranometro Modelo: SR30-L Sensor Anemoveleta Modelo: 05108-45-L	77,553.00	1	77,553.00
			IGV (18%)	31,293.54
			Total (S/)	205,146.54

Tabla 4.1: Estimación de precios de los sensores ambientales.

Costos de la red WIFI-LPWAN

La red WIFI-LPWAN representa la integración de dos tecnologías de red distintas. La primera, la red WIFI, se establecería a través de enlaces de repetición por microondas, originándose en la Municipalidad de Cashapampa y extendiéndose hasta la laguna Arhuaycocha. Para ello, se requerirían 5 estaciones de repetición (véase sección 3.8). Por otro lado, la red LPWAN se constituiría a partir de un Gateway y 7 nodos finales. Cada uno de los nodos corresponde a la interfaz de comunicación para los sensores.

La red WIFI está constituida por un total de cinco nodos de comunicación, incluyendo una estación base, tres estaciones de repetición y una estación final. Para la conectividad, la estación base y la estación final están equipadas con una radio de comunicación punto a punto (PtP), mientras que cada estación de repetición intermedia necesita dos radios, sumando un total de ocho radios para toda la red. Además, cada nodo de comunicación está dotado de un Switch PoE para facilitar la transmisión de datos y energía.

Dado el entorno de alta montaña y la ausencia de redes eléctricas convencionales, se ha previsto un kit de energía solar aislada para cada nodo, garantizando así su autonomía energética. Para completar la instalación, se utilizará una torre de nueve metros

ventilada, que servirá de soporte tanto para los equipos de comunicación como para un pararrayos, asegurando la protección y el óptimo funcionamiento de la red.

n.	Descripción	Costo Unitario (S/)	Cantidad	Sub Total (S/)
1	Radio de Comunicación PtP Marca: Ubiquiti Modelo: PBE-5AC-300	445	8	3,560.00
2	Switch PoE Marca: Ubiquiti Modelo: USW-Lite-8-PoE	407	5	2,035.00
3	Kit Solar Aislada 1000W 24V 4550 Wh/día	7,500	5	37,500.00
4	Torre ventada de base 30x30x30 Altura 9 metros	480	5	2,400.00
5	Accesorios de Torre Ventada	250	5	1,250.00
6	Sistema de pararrayo (Pozo a tierra, pararrayo Franklin)	4,000	5	20,000.00
IGV (18 %)				12,014.10
Total (S/)				78,759.10

Tabla 4.2: Estimación de precios de los equipos e insumos para la implementación del sistema de radioenlaces WiFi.

El segmento LPWAN se compone de un gateway y siete controladores IoT. Cada controlador IoT estaría conectado, mediante el protocolo modbus, al registrador de datos de los sensores. El gateway estaría conectado a un puerto ethernet (RJ45) del switch PoE correspondiente a la estación final de la red WIFI. Cada controlador IoT estaría configurado como un maestro y cada registrador de datos de los sensores estarían configurados como esclavos, los controladores IoT enviarían peticiones de datos a los registradores de datos a un intervalo de tiempo de un minuto, luego, la información recibida se enviaría al gateway LPWAN.

n.	Descripción	Costo Unitario (S/)	Cantidad	SubTotal (S/)
1	Gateway LPWAN Marca: Milesight Modelo: UG67-L04EU-915M	4,768.50	1	4,768.50
2	Controlador IoT Marca: Milesight Modelo: UC501-915M	792.88	7	5,550.16
3	Accesorios de instalación (Accesorios de montaje, mástil galvanizado)	300	7	2,100.00
IGV (18 %)				2,235.36
Total (S/)				14,654.02

Tabla 4.3: Estimación de precios del equipamiento necesario para implementar una red LPWAN empleando un gateway y siete controladores IoT. Cada controlador se conecta al registrador de datos de los sensores.

Costos de transportes e instalación de la red WIFI-LPWAN

Se estima que el transporte de materiales y equipos requerirá un total de 15 días, utilizando animales de carga y arrieros para llegar tanto a los puntos de instalación de los sensores y nodos LPWAN como a las ubicaciones de los nodos de la red WiFi. La instalación de los sensores, nodos y el gateway LPWAN se calcula que tomará aproximadamente 21 días, considerando que hay siete ubicaciones de sensores y que cada instalación durará tres días.

De igual manera, se prevé que la instalación de cada nodo de la red WiFi demandará cinco días, sumando un total de 35 días para los cinco nodos de la red. En consecuencia, el tiempo total estimado para los trabajos en campo es de 71 días, tomando en cuenta los 15 días para el transporte, 21 días para la instalación de los componentes del segmento LPWAN y 35 días para el montaje del segmento WiFi.

n.	Descripción	Recurso	Costo Unitario (S/)	Cantidad	Días de trabajo	Sub Total (S/)	
1	Transporte de materiales y equipamiento	Acémilas de carga	50	10	15	7,500.00	
2		Caballos de carga	70	3	15	3,150.00	
3		Arrieros	100	3	15	4,500.00	
4	Instalación de sensores y gateway LPWAN (Se estima 3 días de trabajo por la instalación de cada sensor)	Obreros de construcción	150	3	21	9,450.00	
5		Guía de montaña	300	2	21	12,600.00	
6		Materiales de construcción	400	7	-	2,800.00	
7	Instalación de repetidoras WIFI (Se estima 7 días de trabajo por la instalación de nodo de la red WIFI)	Obreros de construcción	150	3	35	15,750.00	
8		Guía de montaña	300	2	35	21,000.00	
9		Materiales de construcción	500	7	-	3,500.00	
10	Supervisión de la instalación y puesta en marcha (La supervisión abarca el total de días de instalación de la red LPWAN[21 días] y el total de días de la instalación de la red WIFI[35 días])	Ingeniero	500	1	56	28,000.00	
						IGV (18%)	19,485.00
						Total	127,735.00

Tabla 4.4: Estimación de costos para la instalación de los sensores ambientales en el segmento de red LPWAN-WIFI.

Costos de la red M2M-IoT Satelital

En total se requiere siete transmisores satelitales para cada uno de los sensores ambientales. El transmisor satelital se comunicaría a través del protocolo modbus con el registrador de datos y obtendría los valores registrados por los sensores. La frecuencia de lectura y envío de datos sería en intervalos fijos de 5 minutos.

n.	Descripción	Costo Unitario (S/)	Cantidad	Sub Total (S/)	
1	Terminal Satelital Marca: ORBCOMM Modelo: ST 6100	4,924.00	7	34,468.00	
2	Accesorios de instalación (Accesorios de montaje, mástil galvanizado)	300.00	7	2,100.00	
				IGV (18%)	6,582.24
				Total (S/)	43,150.24

Tabla 4.5: Estimación de precios de los transmisores satelitales M2M-IoT Satelital.

Costos de transportes e instalación de la red M2M-IoT Satelital

Para el transporte de materiales y equipos de comunicación se estima un total de cinco días. La instalación de los sensores y transmisores M2M-IoT tomaría un total de 21 días, considerando tres días por la instalación de cada sensor.

n.	Descripción	Recurso	Costo Unitario (S/)	Cantidad	Días de trabajo	Sub Total (S/)	
1	Transporte de materiales y equipamiento	Acémilas de carga	50	10	5	2,500.00	
2		Caballos de carga	70	3	5	1,050.00	
3		Arrieros	100	3	5	1,500.00	
4	Instalación de sensores y transmisores M2M-IoT Satelital (3 días de trabajo por cada sensor)	Obreros de construcción	150	3	21	9,450.00	
5		Guía de montaña	300	2	21	12,600.00	
6		Materiales de construcción	400	7	-	2,800.00	
7	Supervisión de la instalación y puesta en marcha	Ingeniero	500	1	21	10,500.00	
						IGP (18%)	7,272.00
						Total	47,672.00

Tabla 4.6: Estimación de costos de instalación de los transmisores M2M-IoT Satelital en los 7 puntos de ubicación de los sensores ambientales.

4.1.2. Costos operativos

Costos del mantenimiento de sensores

Un aspecto clave de los costos operativos recurrentes para los sensores incluye tanto el mantenimiento como la calibración. Se estima una inversión anual que cubre la calibración de los sensores de nivel de agua, los sensores de deslizamiento de masas y los sensores meteorológicos. Esta inversión también contempla el servicio de mantenimiento para las conexiones eléctricas.

n.	Descripción	Costo Unitario (S/)	Cantidad	Sub Total (S/)
1	Servicio de calibración de sensor de Nivel de Espejo de Agua	1,500.00	1	1,500.00
2	Servicio de calibración de Sensor de Deslizamiento de Masas	1,500.00	1	1,500.00
3	Servicio de mantenimiento de conexiones eléctricas	500.00	1	500.00
4	Servicio de calibración de sensores meteorológicos	3,000.00	1	3,000.00
			IGV (18 %)	1,170.00
			Total (S/)	7,670.00

Tabla 4.7: Estimación de los costos de mantenimiento anual de los sensores ambientales.

Red WIFI-LPWAN

Los fabricantes recomiendan realizar un mantenimiento anual de las conexiones eléctricas y redes de internet. En el cálculo también se incluye el servicio mensual de internet.

n.	Descripción	Costo Unitario (S/)	Cantidad	Sub Total (S/)
1	Servicio de limpieza/recambio de terminales de red	1,500.00	1	1,500.00
2	Mantenimiento de las conexiones eléctricas de los sistemas fotovoltaicos aislados	1,500.00	1	1,500.00
3	Servicio de internet (S/ 75/mes)	75	12	900
			IGV (18 %)	702.00
			Total (S/)	4,602.00

Tabla 4.8: Estimación de los costos operativos anuales de la red WIFI-LPWAN.

Red M2M-IoT Satelital

Los costos operativos incluyen servicios de mantenimiento y limpieza para las conexiones eléctricas y la red. Además, se contempla el plan anual de datos para cada transmisor satelital. El precio estimado del plan anual de 200 Kb por mes se ajusta a las tarifas del mercado peruano para el servicio IsatDataPro de Inmarsat. Se ha calculado que el costo anual del servicio de datos para cada transmisor Orbcomm 6100 es de S/ 4619.00.

n.	Descripción	Costo Unitario (S/)	Cantidad	Sub Total (S/)	
1	Servicio de limpieza/recambio de terminales de red	1,500.00	1	1,500.00	
2	Mantenimiento de las conexiones eléctricas de los sistemas fotovoltaicos aislados	1,000.00	1	1,000.00	
3	Plan Anual PE IDP 200 Kb/mes Compatible con la plataforma del transmisor satelital modelo ST6100 Orbcomm. Taza de transferencia de datos de 200kb. Interfaz de comunicación del sensor Ethernet / Modbus. Lenguajes de programación Lua.	4,619.70	7	32,337.90	
				IGV (18 %)	6,360.82
				Total (S/)	41,698.72

Tabla 4.9: Estimación de los costos operativos anuales de la red M2M-IoT Satelital.

4.2. Escenario de análisis económico

Los sistemas de comunicaciones móviles son casi inexistentes en las regiones de alta montaña del Perú. Ante esta realidad, se identifica un nicho de mercado potencialmente aprovechable en los servicios de monitoreo de peligros naturales en estos entornos remotos. Para ello, se evalúa el beneficio de implementar y prestar servicios mediante las redes WIFI-LPWAN y M2M-IoT Satelital. Ambas redes permiten monitorear en tiempo real las condiciones de peligro en la laguna Arhuaycocha. La información generada por estos sistemas podría ser utilizada para reducir la vulnerabilidad de las personas ante los peligros naturales. Una de las aplicaciones prácticas de la información producida por estas redes sería el aviso anticipado a los pobladores en caso de un desastre, lo que permitiría al estado y a los organismos involucrados tomar medidas para salvaguardar vidas humanas.

En el informe técnico titulado “Evaluación del riesgo por aluvión en la parte baja de la subcuenca del río Blanco Santa Cruz, distrito de Santa Cruz, provincia de Huaylas, departamento de Áncash”, elaborado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña [INAIGEM, 2020]. Se identifica un total de 525 personas expuestas al área de influencia de un peligro natural de tipo aluvión. Frente a la ocurrencia del aluvión, cualquiera de los sistemas de comunicación propuestos cumpliría la función de detectar el incidente y reportar el suceso a las instancias que correspondan, como los Centros de Operaciones de Emergencia. Esta acción ayudaría a desencadenar las acciones necesarias para salvaguardar la integridad de las personas.

Es decir, los diseños propuestos de monitoreo tendrían el objetivo práctico de reducir la mortalidad de las personas frente a peligros naturales en alta montaña. En el trabajo titulado “Estimación del costo social por fallecimiento prematuro”, elaborado por el

Profesor Luis Seminario de Marzi, se estiman los beneficios asociados por la preservación de la vida humana en el Perú, es decir, la valorización monetaria que la sociedad atribuye a la vida de las personas [Seminario-de Marzi, 2017]. Los resultados de dicho estudio se muestran en tabla siguiente:

Sexos	Valor Estadístico de la Vida Humana	
	En Soles	En Dólares
Hombres	520,910.65	154,341.08
Mujeres	413,066.55	122,387.85
Promedio	465,784.50	138,007.70

Figura 4.1: Estimación del valor estadístico de la vida humana en el Perú. Fuente: Cuadro resumen del estudio de [Seminario-de Marzi, 2017].

Se identificaron 525 personas en condición de vulnerabilidad ante la ocurrencia de un desastre en la laguna Arhuaycocha. Ante esta situación, el Estado peruano se ve en la necesidad de implementar proyectos o contratar servicios que garanticen una condición de vida segura para los pobladores. De acuerdo con las estimaciones de Seminario de Marzi, estas 525 personas representan un valor monetario de S/ 244,536,862.5, lo que justifica la implementación de estrategias que ayuden a garantizar la conservación del capital humano.

La estrategia planteada considera la posibilidad de que el Estado peruano contrate los servicios especializados de una empresa dedicada al monitoreo de lagunas peligrosas en ambientes de montaña. Esta empresa tendría una tarifa plana anual de **S/ 300,000**. Con esta premisa, en las secciones siguientes se desarrolla un análisis de viabilidad económica entre la opción de implementar una red LPWAN-WIFI o M2M-IoT Satelital.

4.3. Análisis Cuantitativo

Para evaluar la rentabilidad tanto de la red la WIFI-LPWAN, así como de la red M2M-IoT Satelital. Se aplica la metodología del Valor Presente Neto (VPN), en esta metodología se suman los flujos de efectivos esperados en el futuro, descontados al presente utilizando una tasa social de descuento del 8 % [Seminario-de Marzi, 2017].

La fórmula del VPN es la siguiente:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+r)^t}$$

Donde:

- F_t es el flujo de efectivo en el período
- r es la tasa de descuento

- t es el número del período de tiempo (años)
- n es el número total de períodos

4.3.1. Valor Presente Neto de la solución WIFI-LPWAN

La solución WIFI-LPWAN requeriría un costo de inversión total de S/ 426 294.66, esto incluye la adquisición sensores de medición, los equipos de comunicaciones WIFI, los equipos LPWAN (LoraWAN), así como también los costos de instalación. La estimación de costos detallada se observa en la apartado 4.1.

n.	Resumen de costos de inversión	Sub Total (S/)
1	Costos de sensores	205,146.54
2	Costos de equipos WIFI	78,759.10
3	Costos de equipos LPWAN	14,654.02
4	Costos de traslado e instalación	127,735.00
	Total	426,294.66

Tabla 4.10: Resumen de costos de inversión para la implementación de la red WIFI-LPWAN.

Para el cálculo del flujo neto anualizado se consideran como entradas los beneficios monetarios por **la contratación del servicio de monitoreo de lagunas peligrosas**, como salidas costos de inversión y costos operativos como el mantenimiento de sensores y redes.

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
1 Entradas						
2 Preservación de la vida humana	-	300,000.00	300,000.00	300,000.00	300,000.00	300,000.00
3 Total de entadas		300,000.00	300,000.00	300,000.00	300,000.00	300,000.00
4 Salidas (Tasa de inflación 3%)						
5 Costo de inversión	426,294.66					
6 Mantenimiento de sensores		7,670.00	7,900.10	8,137.10	8,381.22	8,632.65
7 Mantenimiento de las redes		4,602.00	4,740.06	4,882.26	5,028.73	5,179.59
8 Total de salidas	426,294.66	12,272.00	12,640.16	13,019.36	13,409.95	13,812.24
9 Flujo Neto Anualizado	-426,294.66	287,728.00	287,359.84	286,980.64	286,590.05	286,187.76

Tabla 4.11: Flujo neto anual de la red WIFI-LPWAN.

Teniendo en cuenta los costos de inversión y el flujo de caja calculó el Valor Presente Neto (VPN) de la red WIFI-LPWAN, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

$$\text{Costo inicial} = F_0 = S/ - 426,294,66$$

Flujos de efectivo esperados = F_1, F_2, F_3, F_4, F_5

F1	F2	F3	F4	F5
287,728.00	287,359.84	286,980.64	286,590.05	286,187.76

Tabla 4.12: Resumen de flujo de cada anual.

Tasa social de descuento = $r = 8\% = 0,08$

Número total de periodos = 5 Años

Aplicando la formula del VPN se tiene:

$$\mathbf{VPN = S/719,726,21}$$

$$\mathbf{TIR = 61\%}$$

Dado que el VPN es positivo, la red WIFI-LPWAN se considera rentable bajo la tasa de descuento social del 8%. Esto significa que se espera que la red genere un valor presente neto de S/ 719,726.21 por encima del costo inicial de la inversión, ajustado al valor del dinero en el tiempo. Asimismo, se obtiene una tasa interna de retorno de 61%.

4.3.2. Valor Presente Neto de la solución IoT-M2M Satelital

La solución IoT-M2M Satelital requeriría un costo de inversión total de S/ 295 968.78, esto incluye la adquisición sensores de medición, los equipos de comunicaciones M2M-IoT Satelital (ST 6100 Orbcomm), así como también los costos de instalación.

n.	Resumen de costos de inversión	Sub Total (S/)
1	Costos de sensores	205,146.54
2	Costos de M2M-IoT Satelital	43,150.24
4	Costos de instalación	47,672.00
	Total	295,968.78

Tabla 4.13: Costos de inversión para la implementación de la red M2M-IoT Satelital.

Al igual que en el caso anterior, para el cálculo del flujo neto anualizado se consideran como entradas los beneficios monetarios por la acción de preservar la vida humana de la población vulnerable, como salidas costos de inversión y costos operativos como el mantenimiento de sensores y el servicio satelital.

n.	Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
1	Entradas						
2	Servicio de monitoreo de lagunas peligrosas		300,000.00	300,000.00	300,000.00	300,000.00	300,000.00
3	Total de entadas		300,000.00	300,000.00	300,000.00	300,000.00	300,000.00
4	Salidas (Tasa de inflación 3%)						
5	Costo de inversión	295,968.78					
6	Mantenimiento de sensores		7,670.00	7,900.10	8,137.10	8,381.22	8,632.65
7	Mantenimiento de la red		41,108.72	42,341.98	43,612.24	44,920.61	46,268.23
8	Total de salidas	295,968.78	48,778.72	50,242.08	51,749.35	53,301.83	54,900.88
9	Flujo Neto Anualizado	-295,968.78	251,221.28	249,757.92	248,250.65	246,698.17	245,099.12

Tabla 4.14: Flujo neto anual de la red M2M-IoT Satelital.

Teniendo en cuenta los costos de inversión y el flujo de cada se procedió a calcular el Valor Presente Neto de la red M2M-IoT Satelital. Los parámetros utilizados fueron:

$$\text{Costo inicial} = F_0 = S/ - 295,968,78$$

$$\text{Flujos de efectivo esperados} = F_1, F_2, F_3, F_4, F_5$$

F1	F2	F3	F4	F5
251,221.28	249,757.92	248,250.65	246,698.17	245,099.12

Tabla 4.15: Resumen de flujo de cada anualizado.

$$\text{Tasa social de descuento} = r = 8\% = 0,08$$

$$\text{Número total de periodos} = 5 \text{ Años}$$

Aplicando la formula del VPN se tiene:

$$\text{VPN} = S/695,980,91$$

$$\text{TIR} = 80\%$$

Dado que el VPN es positivo, la red tambien se considera rentable bajo la tasa de descuento social del 8%. Esto significa que se espera que el proyecto genere un valor presente neto de S/ 695,980.91 por encima del costo inicial de la inversión, ajustado al valor del dinero en el tiempo. Asimismo, se obtiene una tasa interna de retorno de 80%.

Capítulo 5

Análisis Técnico Económico

En este apartado se analizan las ventajas y desventajas de las redes WIFI-LPWAN y M2M-IoT Satelital. Se comparan las velocidades de transmisión de datos de ambas tecnologías, además de detallar sus limitaciones técnicas y repercusiones económicas. Se concluye que ambas redes son capaces de soportar el tráfico de datos generado por sensores ambientales y poseen el potencial de aumentar dicho tráfico en el futuro. No obstante, también se identifican las limitaciones propias de los sensores, las cuales condicionan el desempeño de las redes, así como los costos asociados a su implementación y operación.

5.1. WIFI-LPWAN

5.1.1. Ventajas

La red de transporte WiFi, en teoría, está diseñada para soportar un tráfico de datos de hasta 42.2 Mbps. Por otro lado, la red LPWAN con tecnología LoRa ofrece una velocidad mínima de transmisión de 4.3 kbps para el modelo Okumura-Hata el cual es el más conservador, mientras que para el modelo ITU-R P1546 el más optimista se obtiene 12.3 Kbps. Considerando que la demanda estimada por los sensores es 0.7 kbps, los resultados sugieren que el uso de la red LPWAN LoRa representaría apenas un 16.2 % y 5.6 % de su capacidad total en el escenario conservador y optimista respectivamente. Esto indica que la red permitiría la posibilidad de agregar más sensores o incrementar la carga total de datos transmitidos. Asimismo, la red WiFi también cuenta con un margen de capacidad disponible en la velocidad de transmisión, lo que permite la transmisión de datos desde otros dispositivos, como cámaras o micrófonos, sin afectar su rendimiento.

En promedio, los sensores LPWAN alcanzan una disponibilidad del 81 % en el escenario más pesimista, mientras que en el escenario optimista se logra un 93 %. Estos valores pueden incrementarse al mejorar factores como la ganancia de la antena del transmisor, la potencia del transmisor y la altura del receptor. En relación con este último factor, se ha observado que una mejor línea de vista entre el gateway y el sensor LPWAN permite obtener mayores tasas de recepción de señal. Esta configuración representa una ventaja

importante, ya que en tecnologías como LoRa es posible controlar la ubicación tanto del gateway como del sensor, facilitando así la optimización de su desempeño.

En relación con el consumo energético de los sensores, se determinó que la tecnología LPWAN presenta un consumo significativamente menor en comparación con la tecnología satelital. En promedio, la red LPWAN requiere solo el 14.6 % del consumo energético necesario para operar con la red satelital. Este bajo requerimiento energético se traduce en una menor inversión en baterías y paneles solares. Además, las reducidas exigencias de potencia tanto en paneles como en baterías implican un menor volumen y peso de los equipos, lo que a su vez optimiza la logística durante las labores de instalación.

Otra ventaja importante de la red WiFi-LPWAN es la disponibilidad y monitoreo de cada nodo que la compone, tanto en la red WiFi como en el segmento LPWAN. Considerando que la red WiFi-LPWAN contaría con una arquitectura de red definida por software (SDN, por sus siglas en inglés), las funciones de control de red y el reenvío de paquetes de datos se pueden gestionar desde un centro de operaciones de red (NOC). Esta característica permite adaptar las configuraciones de la red según diferentes escenarios climáticos, dado que los fenómenos meteorológicos tienen un alto impacto en la relación señal-ruido (SNR) y, por ende, en el desempeño de la red.

Otra ventaja significativa es que en la red WiFi-LPWAN no existen límites de tiempo para la frecuencia de envío de datos. Aunque en los cálculos actuales se considera una frecuencia de transmisión de un minuto, este intervalo podría reducirse a valores cercanos al "tiempo real". Si en algún momento se requiere una transmisión de datos en el orden de segundos, la red WiFi-LPWAN estaría preparada para satisfacer esa demanda. Sin embargo, la frecuencia de envío de datos está principalmente condicionada por las limitaciones técnicas de los sensores ambientales. Por ejemplo, los sensores de nivel de agua requieren un total de 2 segundos para obtener un valor promedio, mientras que los sensores de cuerda vibrante necesitan 18 segundos para obtener mediciones suficientes y confiables. En este escenario, la frecuencia de transmisión depende principalmente de las capacidades de los sensores y en segundo nivel de las características de la red.

5.1.2. Desventajas

La tecnología LoRa permite una capacidad máxima de 256 bytes en el payload de cada paquete de datos. Es decir, cada transmisión enviada por un sensor no puede exceder este límite. Por lo tanto, este valor constituye la restricción superior de datos que puede enviarse en cada transmisión desde un sensor hacia el gateway LPWAN. En el diseño analizado, cada medición de sensor requiere en promedio 75 bytes de payload (ver Tabla 3.6), por lo que tanto el diseño propuesto de transmisión de datos se encuentra dentro de los límites físicos establecidos por la tecnología. No obstante, en escenarios donde se incrementa el número de sensores o se requiera enviar más variables por paquete, esta limitación debe ser cuidadosamente considerada en el diseño del sistema.

La expansión de la red de comunicación desde el centro poblado de Cashapampa hasta la laguna Arhuaycocha, a través de una red de transporte WiFi, requeriría la instalación de cinco nodos interconectados de manera inalámbrica mediante enlaces punto a punto. El costo estimado de todo el segmento WiFi sería de S/ 78,759, con un costo aproximado por nodo de S/ 15,751.

Cada nodo incluiría una torre ventada de acero inoxidable, paneles solares, baterías, equipos de comunicación, pararrayos, pozos a tierra y un cerco perimétrico de seguridad. Estos componentes formarían un activo de telecomunicaciones de mediana escala, cuya implementación y mantenimiento demandarían una inversión considerable, tanto en infraestructura como en medidas de seguridad

Uno de los principales retos asociados a la red WIFI es la seguridad de los nodos, los cuales podrían ser vulnerables a actos de vandalismo por parte de las comunidades locales. Para mitigar este riesgo, sería necesario llevar a cabo campañas de socialización con dichas comunidades, con el fin de fomentar una relación cercana y positiva entre los pobladores y la tecnología instalada. No obstante, estas iniciativas sociales también representarían un aumento en la inversión requerida para el proyecto. Con lo cual se concluye que la implementación de esta red no solo supone un desafío técnico y financiero, sino que también demanda un enfoque social que permita asegurar la sostenibilidad del sistema en el tiempo.

5.2. M2M-IoT Satelital

5.2.1. Ventajas

Los resultados del diseño de la red M2M-IoT satelital indican que esta es capaz de soportar un tráfico de datos mínimo de 133.5 kbps en un escenario pesimista, caracterizado por alta variabilidad en la señal debido a condiciones climáticas desfavorables. En el escenario optimista, la capacidad de transmisión alcanza hasta 432.4 kbps. Considerando que cada sensor requiere únicamente 0.61 kbps, se estima que la red utilizaría solo el 0.45 % y el 0.14 % de su capacidad total en los escenarios pesimista y optimista, respectivamente. Esto evidencia una amplia flexibilidad para incorporar un mayor número de sensores o aumentar el volumen de datos transmitidos, sin necesidad de realizar ajustes significativos en la infraestructura existente.

Se determinó que el enlace satelital presenta un alto rendimiento, alcanzando una disponibilidad del 99,9 %. La disponibilidad sería homogénea para todos los dispositivos puesto que todos los sensores presentan una línea de vista despeja con el satelital. Sin embargo, el porcentaje de disponibilidad podría cambiar si la dispersión o variación de la señal recibida con respecto a la señal transmitida es diferente del valor de 10 dB considerado en los cálculos.

Entre las principales ventajas técnicas y económicas de la red M2M-IoT Satelital destaca la reducción significativa en la inversión en equipos de comunicación. Según los cálculos presentados en el capítulo anterior, la infraestructura satelital requiere un 56 % menos de inversión en comparación con la red WIFI-LPWAN. Esto se debe a que la red satelital no necesita una red de transporte intermedia, a diferencia de la tecnología WIFI, que sí lo exige.

En la red satelital M2M-IoT Satelital únicamente se requeriría la adquisición de siete transmisores ST6100, que transmitirían los datos de los sensores y los enviarían directamente a los satélites de la red Inmarsat. Este proceso simplificado no solo agiliza

la transmisión, sino que también reduce de manera notable los costos asociados a los equipos de comunicación.

5.2.2. Desventajas

Una de las principales limitaciones del segmento satelital es la restricción en la cantidad de datos que pueden transmitirse mensualmente hacia el satélite. En el capítulo anterior se mencionó un plan de datos con un límite de 200 KB al mes, lo que implica que el terminal satelital ST6100 solo puede enviar hasta esa cantidad de información durante dicho periodo. Considerando que cada lectura de los sensores genera, en promedio, 75 bytes, se estima que en un periodo de 30 días podrían realizarse aproximadamente 2666 transmisiones, lo que equivale a 88 transmisiones diarias o alrededor de 3 transmisiones por hora. Este ritmo de transmisión resulta insuficiente para aplicaciones de monitoreo de peligros, las cuales requieren un seguimiento frecuente y en tiempo casi real para una respuesta oportuna ante eventos críticos.

Según los cálculos de consumo energético, el transmisor satelital ST6100 presenta un consumo significativamente mayor en comparación con su contraparte LPWAN LoRa UC501-915m. Esta diferencia implica que un sensor equipado con transmisor satelital consume aproximadamente un 84 % más de energía que uno basado en tecnología LPWAN. Esta desventaja técnica también conlleva implicaciones económicas, debido a los mayores costos asociados a la necesidad de paneles solares y baterías de mayor capacidad para satisfacer la demanda energética.

Aunque es posible aumentar el límite de datos, esto implicaría un incremento en los costos del servicio. El plan actual de 200 KB tiene un precio de S/ 4,619.7, y según estudios de mercado, existe una relación directa entre el aumento del límite de datos y el costo del plan. Es decir, duplicar el límite mensual también duplicaría el costo del servicio, lo que incrementaría significativamente los gastos operativos.

Otra limitación significativa es la complejidad de integrar el terminal satelital ST6100 con registradores de datos y sensores ambientales. Aunque la documentación menciona la compatibilidad con el protocolo de comunicación Modbus, el terminal debe ser programado en el lenguaje Lua. Si bien este lenguaje es ampliamente utilizado en la industria, su implementación en este contexto requiere un nivel adicional de especialización por parte del programador para desarrollar las rutinas necesarias para la recepción y envío de datos satelitales. Esto implica que cualquier modificación en la lógica de operación de los transmisores o la resolución de problemas técnicos imprevistos requeriría la intervención de especialistas, lo que resultaría en tiempos prolongados y un costo adicional.

Capítulo 6

Conclusiones

1. La revisión de la literatura sobre antecedentes similares al caso de estudio demuestra que existen aplicaciones de redes WiFi de largo alcance utilizadas para la medición de variables ambientales, como el nivel del espejo de agua. Entre las experiencias registradas se encuentran los casos de monitoreo de las lagunas Palcacocha y 513 en Perú, así como el monitoreo del lago Imja Tsho en Nepal. Por otro lado, la aplicación de las tecnologías LPWAN, como Sigfox, LoRa y NB-IoT, se ha centrado en zonas urbanas y semiurbanas. Un caso específico de monitoreo con estas tecnologías es la detección de deslizamientos de masas en los Andes Tropicales de Colombia. Con respecto a la aplicación de la tecnología satelital en el monitoreo de variables ambientales, se identificó la experiencia del monitoreo del lago Shako Cho en India mediante la red satelital INSAT-3. Se identificaron casos de uso de redes híbridas WiFi-LPWAN o M2M-IoT satelital en aplicaciones diferentes del monitoreo de variables ambientales en áreas montañosas.
2. Con mínimos recursos estructurales y electrónicos, el modelo Okumura-Hata predice la mayor atenuación de señal entre los modelos evaluados, alcanzando valores mínimos de hasta -139 dBm para el sensor más alejado del gateway (SDM, a 2.1 km). Por su parte, el modelo COST231-Hata presenta resultados similares, con una diferencia promedio de apenas -1 dB respecto al modelo Okumura-Hata en la simulación analizada. En cambio, el modelo ITU-R P.1546 ofrece las estimaciones más optimistas, registrando una potencia mínima de -134 dBm para el sensor SDM. Las simulaciones muestran que la potencia de recepción en el gateway LPWAN está estrechamente relacionada con la distancia entre el transmisor y el gateway. Asimismo, se identificó que los factores con mayor influencia en la calidad de la señal recibida son: la ganancia de la antena del transmisor, la potencia del transmisor y la altura del receptor. Esto sugiere que es más beneficioso priorizar mejoras en las especificaciones técnicas del transmisor —como el aumento de potencia de emisión y la ganancia de la antena— en lugar de mejoras estructurales, como el incremento de la altura del receptor. En cuanto a la red M2M-IoT satelital, se obtuvo una potencia de recepción en el satélite de -122.6 dBm, valor constante para todos los sensores analizados.
3. Para los sensores LPWAN, se alcanza una disponibilidad de enlace promedio del 81 % bajo un escenario pesimista, en el cual se minimizan las especificaciones

técnicas de los transmisores y la infraestructura, además de considerarse valores negativos de SNR. En contraste, para la red M2M-IoT satelital se estimó una disponibilidad del 99.9 % en un escenario igualmente pesimista, caracterizado por un SNR mínimo de 0.4 dB y una dispersión de la señal recibida respecto a la señal transmitida de 10 dB.

4. Para un ancho de banda de 125 kHz, la tecnología LoRa LPWAN alcanza velocidades máximas de transmisión de 51.6 kbps, 64.1 kbps y 214.8 kbps, y velocidades mínimas de 4.3 kbps, 5.5 kbps y 12.3 kbps, según los modelos de propagación Okumura-Hata, COST231-Hata e ITU-R P.1546, respectivamente. En contraste, la tecnología M2M-IoT satelital ofrece velocidades máximas de 432.4 kbps y mínimas de 133.5 kbps, lo que sugiere un mayor rendimiento en términos de velocidad de transmisión. No obstante, este rendimiento está limitado por las restricciones impuestas por los planes de datos y el número máximo de transmisiones diarias. En particular, el terminal ST6100, bajo un plan de 200 KB mensuales, permitiría que los sensores (SNEA, SDM, SM) transmitan un máximo de aproximadamente 3 mensajes por hora. En cambio, la tecnología LPWAN no presenta limitaciones en la cantidad de transmisiones, lo que proporciona mayor flexibilidad operativa. Finalmente, las velocidades de transmisión estimadas para ambas tecnologías, bajo los distintos escenarios evaluados, superan los requerimientos mínimos de 0.7 kbps para LPWAN y 0.61 kbps para M2M-IoT satelital, cumpliendo adecuadamente con la demanda operativa de los sensores en el diseño de red propuesto.
5. En relación con el consumo energético de los sensores, se determinó que la tecnología LPWAN presenta un consumo significativamente menor en comparación con la tecnología satelital. En promedio, la red LPWAN requiere solo el 14.6 % del consumo energético necesario para operar con la red M2M-IoT Satelital. Este bajo requerimiento energético se traduce en una menor inversión en baterías y paneles solares. Además, las reducidas exigencias de potencia tanto en paneles como en baterías implican un menor volumen y peso de los equipos, lo que a su vez optimizaría la logística durante de una posible implementación.
6. Durante el diseño de la red LPWAN se enfrentaron varias dificultades para determinar la ubicación ideal de los sensores ambientales, siendo la topografía del lugar de estudio la principal desventaja. En una zona montañosa, establecer una línea de vista sin obstrucciones entre el Gateway LPWAN y los sensores ambientales resultó desafiante. La mayoría de los obstáculos, como rocas o montículos de sedimento, impedían definir una línea de vista despejada. En contraste, para el diseño de la red M2M-IoT Satelital no se registraron obstáculos ni obstrucciones en la línea de vista entre los sensores y el receptor satelital Inmarsat I-4 F3. La longitud orbital del satélite (-98°) permite establecer una conexión casi perpendicular con estaciones situadas en Perú y otras partes de Sudamérica, lo que facilita una comunicación más eficiente. Estos resultados indican una ligera ventaja de las redes M2M-IoT satelitales sobre las LPWAN, especialmente en las etapas de diseño y planificación de los enlaces.
7. El análisis económico revela que la inversión requerida para implementar una red WIFI-LPWAN en ambientes de alta montaña asciende a un total de S/ 221,148, mientras que la red M2M-IoT Satelital requiere una inversión de S/ 90,822. La mayor inversión necesaria para la red WIFI-LPWAN se debe a los gastos de

traslado e instalación en alta montaña, que ascienden a S/ 127,735. Por otro lado, los costos anuales de operación y mantenimiento son de S/ 4,602 para la red WIFI-LPWAN y de S/ 41,696 para la red M2M-IoT Satelital. La significativa diferencia en los costos de operación y mantenimiento entre ambas redes se debe principalmente al elevado costo del plan de datos satelital. La implementación de una red WIFI-LPWAN implica una mayor inversión inicial, atribuible en gran medida a los gastos de mano de obra que se requiere para una eventual instalación. En contraste, aunque la implementación de la red M2M-IoT Satelital es menos costosa inicialmente, los costos operativos son considerablemente más altos debido al plan de datos de los transmisores satelitales. En conclusión, la elección entre una red WIFI-LPWAN y una red M2M-IoT Satelital dependerá de un balance entre los costos iniciales de instalación y los costos operativos a largo plazo.

8. En el análisis financiero comparativo de la rentabilidad de las redes WIFI-LPWAN y M2M-IoT Satelital, en un escenario donde ambas prestarían el servicio de monitoreo en tiempo real de la laguna peligrosa Arhuaycocha, se encontró que la implementación de la red WIFI-LPWAN, con una inversión inicial de S/ 426,294, generaría un VPN de S/ 719,726 con un TIR asociado del 61 %. Por otro lado, la red M2M-IoT Satelital, con una inversión inicial de S/ 295,968, obtendría un VPN de S/ 695,980 con un TIR del 80 %. Estos resultados indican que ambas redes son rentables debido a sus VPN positivos. Sin embargo, la red WIFI-LPWAN generará un valor neto absoluto ligeramente mayor (S/ 23,746 más) en comparación con la red M2M-IoT Satelital. La red M2M-IoT Satelital, aunque ofrece un menor valor neto absoluto, presenta un mayor retorno porcentual sobre la inversión inicial, lo que sugiere una mayor eficiencia en términos de rendimiento relativo a la inversión.
9. El análisis técnico-económico de las redes WiFi-LPWAN y M2M-IoT satelital confirma que ambas tecnologías representan soluciones viables para el monitoreo ambiental, cada una con ventajas y limitaciones particulares. La red WiFi-LPWAN se destaca por su capacidad para manejar mayores volúmenes de datos y su flexibilidad en la transmisión, lo que la hace adecuada para aplicaciones que requieren un flujo constante de información. No obstante, enfrenta desafíos importantes, como mayores costos de implementación, posibles vulnerabilidades de seguridad en los nodos. Por otro lado, la red M2M-IoT Satelital se presenta como una alternativa más accesible en términos de alta disponibilidad, menor inversión inicial y menor complejidad en infraestructura. Sin embargo, sus principales limitaciones radican en el número de transmisiones posibles de realizar en un intervalo de tiempo y en la necesidad de personal especializado para su gestión. En el contexto específico del monitoreo ambiental de lagunas peligrosas, donde se requiere una recolección de datos continua y frecuente, la red WiFi-LPWAN se establece como la opción más adecuada. Esto se debe a su capacidad para proporcionar una tasa de transmisión que satisface los requerimientos de los sensores, así como a su mayor flexibilidad para el envío de datos, sin restricciones relacionadas a los planes de transmisión o limitaciones en el número de envíos por unidad de tiempo.

Capítulo 7

Trabajos Futuros

1. La limitada capacidad de transmisión de datos en las redes M2M-IoT satelitales puede solucionarse incrementando los planes de datos. Sin embargo, esta medida también aumentaría considerablemente los costos operativos. Una posible estrategia para optimizar estos costos sería estudiar la viabilidad de implementar un sistema de Edge Computing. Este sistema actuaría como un filtro entre los datos recopilados y los que se envían al satélite, analizando previamente si es necesario realizar la transmisión, basándose en si se ha producido un cambio significativo. Para ello, se podrían aplicar metodologías como el análisis de patrones o incluso técnicas de machine learning.
2. Dado que los sensores ambientales representan una inversión significativa en ambas redes, sería relevante analizar el estado del arte en el desarrollo de sensores de bajo costo. Esto podría ofrecer alternativas viables para optimizar la implementación de sistemas de monitoreo en zonas de alto riesgo, como lagunas peligrosas.
3. Actualmente, los servicios satelitales de órbita baja (LEO) están en auge, con ejemplos notables como SpaceX y su servicio de banda ancha satelital. Un estudio interesante sería realizar pruebas experimentales en ambientes de alta montaña durante al menos un año, para evaluar el rendimiento en términos de la tasa de envío exitoso de datos a servidores externos. Los resultados permitirían determinar la viabilidad de estos servicios en el monitoreo de peligros naturales en zonas montañosas.
4. Finalmente, SpaceX está desplegando un nuevo servicio llamado Direct to Cell, el cual, a través de satélites de órbita baja de nueva generación, permitirá la conectividad directa con terminales móviles con cobertura 4G. Aún no está claro cuál será el papel de los operadores móviles en este nuevo escenario, pero el estudio de las ventajas técnicas y económicas de esta tecnología podría ser clave para el monitoreo ambiental en zonas remotas, así como en otros sectores económicos e industriales emergentes.

Bibliografía

- [USG, 2018] (2018). USGS EROS archive - digital elevation - shuttle radar topography mission (SRTM) 1 arc-second global. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>. Accessed: 2024-4-16.
- [Adelantado et al., 2016] Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., and Melia, J. (2016). Understanding the limits of LoRaWAN. *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, (September):8–12.
- [Akpakwu et al., 2018] Akpakwu, G. A., Silva, B. J., Hancke, G. P., and Abu-Mahfouz, A. M. (2018). A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges. *IEEE Access*, 6(c):3619–3647.
- [Alvarado-Lugo, 2018] Alvarado-Lugo, R. (2018). *Diseño e implementación de una red inalámbrica en alta montaña para la transmisión de datos hidrometeorológicos desde la quebrada Cojup hasta la ciudad de Huaraz. 2018*. PhD thesis, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- [AncashNoticias, 2016] AncashNoticias (2016). Equipos del sat fueron destrozados por campesinos.
- [Ashton et al., 2009] Ashton, K. et al. (2009). That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, 22(7):97–114.
- [Awadallah et al., 2019] Awadallah, S., Moure, D., and Torres-González, P. (2019). An Internet of Things (IoT) Application on Volcano Monitoring. *Sensors*, 19(21):4651.
- [Bembe et al., 2019] Bembe, M., Abu-Mahfouz, A., Masonta, M., and Ngqondi, T. (2019). A survey on low-power wide area networks for IoT applications. *Telecommunication Systems*, 71(2):249–274.
- [Cai et al., 2014] Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., Rensch, P. V., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., England, M. H., Wang, G., Guilyardi, E., and Jin, F.-f. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(1):1–6.
- [Carey, 2005] Carey, M. (2005). Living and dying with glaciers: People’s historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global and Planetary Change*, 47(2-4 SPEC. ISS.):122–134.

- [Carréric et al., 2020] Carréric, A., Dewitte, B., Cai, W., Capotondi, A., Takahashi, K., Yeh, S. W., Wang, G., and Guémas, V. (2020). Change in strong Eastern Pacific El Niño events dynamics in the warming climate. *Climate Dynamics*, 54(1-2):901–918.
- [Casals et al., 2017] Casals, L., Mir, B., Vidal, R., and Gomez, C. (2017). Modeling the energy performance of lorawan. *Sensors*, 17(10).
- [Centenaro et al., 2016] Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., and Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5):60–67.
- [Chandrasekharan et al., 2015] Chandrasekharan, S., Al-Hourani, A., Magowe, K., Reynaud, L., and Kandeepan, S. (2015). Propagation measurements for D2D in rural areas. In *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, pages 639–645. IEEE.
- [Chaudhari and Zennaro, 2020] Chaudhari, B. S. and Zennaro, M. (2020). *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Academic Press.
- [Chebrolu et al., 2006] Chebrolu, K., Raman, B., and Sen, S. (2006). Long-distance 802.11b links: Performance measurements and experience. *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*, 2006:74–85.
- [Chen et al., 2022] Chen, Y., Zhang, M., Li, X., Che, T., Jin, R., Guo, J., Yang, W., An, B., and Nie, X. (2022). Satellite-enabled internet of remote things network transmits field data from the most remote areas of the tibetan plateau. *Sensors (Basel)*, 22(10):3713.
- [Cimadevilla, 2018] Cimadevilla, L. (2018). Diseño de una antena plana de comunicaciones por satélite en banda ka con alimentación por guía radial. Master’s thesis, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- [Cochachín and Torres, 2011] Cochachín, A. and Torres, L. (2011). Batimetría de las lagunas Arhuaycocha , Artizón Alta y Baja. Technical report, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos UGRH - Huaraz.
- [Colonia et al., 2017] Colonia, D., Torres, J., Haeberli, W., Schauwecker, S., Braendle, E., Giraldez, C., and Cochachin, A. (2017). Compiling an inventory of glacier-bed overdeepenings and potential new lakes in de-glaciating areas of the peruvian andes: Approach, first results, and perspectives for adaptation to climate Change. *Water (Switzerland)*, 9(5).
- [Control-Ground, 2022] Control-Ground (2022). Wide beam vs. narrow beam. <https://www.groundcontrol.com/knowledge/guides/wide-beam-vs-narrow-beam/>. Accessed: 2024-4-21.
- [Croce et al., 2018] Croce, D., Gucciardo, M., Mangione, S., Santaromita, G., and Tinirello, I. (2018). Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance. *IEEE Communications Letters*, 22(4):796–799.
- [de Carvalho et al., 2012] de Carvalho, J. P., Veiga, H., Pacheco, C. R., and Reis, A. (2012). Performance Evaluation of Laboratory Wi-Fi iee 802.11 g wpa Point-to-Point Links Using TCP, UDP and FTP. *Procedia Technology*, 5:302–309.

- [Dini et al., 2021] Dini, B., Bennett, G. L., Franco, A. M. A., Whitworth, M. R. Z., Cook, K. L., Senn, A., and Reynolds, J. M. (2021). Development of smart boulders to monitor mass movements via the internet of things: a pilot study in nepal. *Earth Surface Dynamics*, 9(2):295–315.
- [Drenkhan et al., 2019] Drenkhan, F., Huggel, C., Guardamino, L., and Haeberli, W. (2019). Managing risks and future options from new lakes in the deglaciating Andes of Peru: The example of the Vilcanota-Urubamba basin. *Science of the Total Environment*, 665:465–483.
- [Espinosa Giralt, 2023] Espinosa Giralt, N. (2023). Análisis de modelos de atenuación por lluvia en enlaces terrestres aplicados a enlaces espaciales. Master’s thesis, Universitat Oberta de Catalunya, España.
- [Esteban, 2021] Esteban, J. (2021). *Seguridad actual en redes Wifi*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- [Evans, 2010] Evans, S. (2010). Field Trip to Peru (EARTH 490 course, Spring 2010) | Wat on Earth | University of Waterloo.
- [Everythingrf, 2018] Everythingrf (2018). NB-IoT frequency bands. <https://www.everythingrf.com/community/nb-iot-frequency-bands>. Accessed: 2024-9-19.
- [Evita, 2021] Evita, M. (2021). Development of an internet of things based volcano monitoring system. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- [Fagan, 2000] Fagan, B. (2000). *The Little Ice Age: How Climate Made History 1300 -1850*, volume 1. Basic Books, New York.
- [Filhol et al., 2023] Filhol, S., Lefeuvre, P.-M., Ibañez, J. D., Hulth, J., Hudson, S. R., Gallet, J.-C., Schuler, T. V., and Burkhart, J. F. (2023). A new approach to meteorological observations on remote polar glaciers using open-source internet of things technologies. *Front. Environ. Sci.*, 11.
- [Finnegan and Brown, 2018] Finnegan, J. and Brown, S. (2018). A Comparative Survey of LPWA Networking. *arXiv*.
- [Frey et al., 2014] Frey, H., García Hernández, J., Huggel, C., Schneider, D., Rohrer, M., Gonzales, C., Muñoz, R., Mesa, L., Cochachin, A., Price, K., and Masias, P. (2014). An Early Warning System for lake outburst floods of the Laguna 513, Cordillera Blanca, Peru. *Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards*, (November):1–8.
- [Gabo, 2023] Gabo (2023). Diferencia entre OFDMA y MU-MIMO en 802.11ax. <https://forum.huawei.com/enterprise/es/diferencia-entre-ofdma-y-mu-mimo-en-802-11ax/thread/667222247577894912-667212883622244352>. Accessed: 2024-4-7.
- [Gaddam and Rai, 2018] Gaddam, S. C. and Rai, M. K. (2018). A comparative study on various LPWAN and cellular communication technologies for IoT based smart applications. *2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research, ICETIETR 2018*, pages 1–8.

- [Gartner, 2019] Gartner (2019). Gartner Identifies the Top 10 Wireless Technology Trends for 2019 and Beyond.
- [GORE Ancash, 2021] GORE Ancash (2021). SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA EN PALCACOCHA ESTÁ CULMINADO AL 100PRONTO SERÁ ENTREGADA a LA MACOMUNIDAD MUNICIPAL “WARAC”.
- [GSMA,] GSMA. GSMA | Mobile IoT Deployment Map | Internet of Things.
- [GSMA, 2018] GSMA (2018). NB-IoT deployment guide – release 2. https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/internet-of-things/gsma_resources/nbiot-deployment-guide-v2/. Accessed: 2024-9-19.
- [GSMA, 2019] GSMA (2019). Security features of LTE-M and NB-IoT networks. Technical report.
- [GSMA, 2022] GSMA (2022). Battery life measurement and current consumption technique. Technical report.
- [Gurung, D., S. Bajracharya, B. R. Shrestha, 2010] Gurung, D., S. Bajracharya, B. R. Shrestha, P. P. (2010). Wi-Fi network at Imja Tsho (lake), Nepal: an Early Warning System (EWS) for Glacial Lake Outburst Flood (GLOF). *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 45:321–326.
- [Haeberli and Linsbauer, 2013] Haeberli, W. and Linsbauer, A. (2013). Brief communication Global glacier volumes and sea level – small but systematic effects of ice below the surface of the ocean and of new local lakes on land. *The Cryosphere*, 7(3):817–821.
- [Haeberli et al., 2017] Haeberli, W., Schaub, Y., and Huggel, C. (2017). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293:405–417.
- [Hoglund et al., 2017] Hoglund, A., Lin, X., Liberg, O., Behravan, A., Yavuz, E. A., Van Der Zee, M., Sui, Y., Tirronen, T., Ratilainen, A., and Eriksson, D. (2017). Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IoT. *IEEE Network*, 31(6):16–22.
- [Huggel et al., 2020] Huggel, C., Cochachin, A., Drenkhan, F., Fluixá-Sanmartín, J., Frey, H., García Hernández, J., Jurt, C., Muñoz, R., Price, K., and Vicuña, L. (2020). Glacier Lake 513, Peru: lessons for early warning service development. *World Meteorological Organization*, 69(1):45–52.
- [Hwang and Liu, 2019] Hwang, S.-H. and Liu, S.-Z. (2019). Survey on 3GPP Low Power Wide Area Technologies and its Application. In *2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS)*, pages 1–5. IEEE.
- [Ikpehai et al., 2019] Ikpehai, A., Adebisi, B., Rabie, K. M., Anoh, K., Ande, R. E., Hammoudeh, M., Gacanin, H., and Mbanaso, U. M. (2019). Low-power wide area network technologies for internet-of-things: A comparative review. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2):2225–2240.
- [INAIGEM, 2017] INAIGEM (2017). Nota Técnica 01: Expedición Científica Huascarán.

- [INAIGEM, 2018] INAIGEM (2018). *Inventario Nacional de Glaciares, Las Cordilleras Glaciares del Perú*, volume 1. Huaraz, first edition.
- [INAIGEM, 2020] INAIGEM (2020). Informe de evaluación del riesgo por aluvión en la parte baja de la subcuenca del río Blanco-Santa cruz, distrito de santa cruz, provincia de huaylas, departamento de ancash. (parte baja de la subcuenca del río blanco - santa cruz, DISTRITO SANTA CRUZ, HUAYLAS, ANCASH). Technical report.
- [INDECI, 2015] INDECI (2015). Aprueban “Lineamientos para la Conformación y Funcionamiento de la Red Nacional de Alerta Temprana – RNAT y la Conformación, Funcionamiento y Fortalecimiento de los Sistemas de Alerta Temprana – SAT” | SINIA.
- [Ingenue, 2020] Ingenue (2020). Dedicated Machine Connectivity for IoT.
- [ITU-R, 2019] ITU-R (2019). Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546-6-201908-I/en>. Accessed: 2025-4-21.
- [Jamali-Rad et al., 2018] Jamali-Rad, H., Campman, X., MacKay, I., Walk, W., Beker, M., van den Brand, J., Bulten, H., and Van Beveren, V. (2018). Iot-based wireless seismic quality control. *The Leading Edge*, 37:214–221.
- [Joseph Quansah et al., 2010] Joseph Quansah, Bernard Engel, and Gilbert Rochon (2010). Early Warning Systems: A Review. *Journal of Terrestrial Observation*, 2(2):5.
- [Khutsoane et al., 2017] Khutsoane, O., Isong, B., and Abu-Mahfouz, A. M. (2017). IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN. *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017-January:6107–6112.
- [Krondorf et al., 2022] Krondorf, M., Bittner, S., Plettemeier, D., Knopp, A., and Wikelski, M. (2022). ICARUS—very low power satellite-based IoT. *Sensors (Basel)*, 22(17):6329.
- [Kumar et al., 2020] Kumar, B., Sathyan, A., Prabhu, T. S., and Krishnan, A. K. (2020). Design Architecture of Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) Early Warning System Using Ultrasonic Sensors. *2020 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems, RAICS 2020*, pages 195–200.
- [Lippuner et al., 2018] Lippuner, S., Weber, B., Salomon, M., Korb, M., and Huang, Q. (2018). EC-GSM-IoT network synchronization with support for large frequency offsets. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, volume 2018-April, pages 1–6. IEEE.
- [López-Moreno et al., 2014] López-Moreno, J. I., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Valero-Garcés, B., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., Zubieta, R., and Alejo-Cochachín, J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112:1–11.
- [LoRa Alliance, 2018] LoRa Alliance (2018). LoRaWAN. <https://resources.lora-alliance.org/document/lorawan-specification-v1-0-3>. Accessed: 2024-9-18.

- [LoRa Alliance, 2020] LoRa Alliance (2020). LoRaWAN for developers - LoRa alliance. <https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers/>. Accessed: 2024-9-16.
- [LoRa Alliance, 2021] LoRa Alliance (2021). LoRaWAN security. <https://lora-alliance.org/security/>. Accessed: 2024-9-18.
- [LoRa Alliance, 2022] LoRa Alliance (2022). LoRaWAN regional parameters. <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>. Accessed: 2024-9-18.
- [Masson-Delmotte et al., 2018] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., and Waterfield, T. (2018). IPCC, 2018: Global Warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of cli. Technical report, IPCC.
- [Mazar, 2014] Mazar, H. (2014). International, regional and national regulation of srds. In *Proceedings of ITU Workshop on Short Range Devices (SDRs) and Ultra Wide Band (UWB)*.
- [Mekki et al., 2019] Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., and Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1):1–7.
- [Mhatre et al., 2007] Mhatre, V. P., Papagiannaki, K., and Baccelli, F. (2007). Interference mitigation through power control in high density 802.11 WLANs. *Proceedings - IEEE INFOCOM*, pages 535–543.
- [Minetti, 1995] Minetti, A. E. (1995). Optimum gradient of mountain paths. *Journal of Applied Physiology*, 79(5):1698–1703.
- [MTC, 2008] MTC (2008). Plan Nacional de Atribución de Frecuencias PNAF. page 36.
- [Nazir et al., 2017] Nazir, S., Fairhurst, G., and Verdicchio, F. (2017). WiSE - a satellite-based system for remote monitoring: WiSE - a satellite-based system for remote monitoring. *Int. J. Satell. Commun. Netw.*, 35(3):201–214.
- [Nwave, 2020] Nwave (2020). Smart Parking Company.
- [Orbcomm, 2024] Orbcomm (2024). IsatData pro. <https://www.orbcomm.com/es/partners/connectivity/satellite/isatdata-pro>. Accessed: 2024-9-26.
- [ORGRDS, 2023] ORGRDS (2023). GOBIERNO REGIONAL IMPULSA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO “CREACIÓN DEL SERVICIO DE ALERTA TEMPRANA FRENTE a ALUVIONES – HUAYCOS – INUNDACIONES EN LOS DISTRITOS DE OCONGATE Y CCARHUAYO DE LA PROVINCIA DE QUISPICANCHI – DEPARTAMENTO DE CUSCO”. <https://observatorio.regioncusco.gob.pe/wp-content/uploads/2023/12/NOTA-DE-PRENSA-067-OCONGATE-CCARHUAYO-SAT-1.pdf>. Accessed: 2024-9-14.

- [OSIPTEL, 2021] OSIPTEL (2021). Perú debe contar con 60 771 estaciones bases celulares antenas para al año 2025. <https://www.osiptel.gob.pe/portal-del-usuario/noticias/peru-debe-contar-con-60-771-estaciones-bases-celulares-antenas-al-ano-2025/>. Accessed: 2024-9-14.
- [Pajares, 2014] Pajares, E. (2014). *Políticas públicas y cambio global: Una prospectiva del cambio climático en la Amazonía andina*.
- [Pham et al., 2019] Pham, T. L., Nguyen, H., Nguyen, H., Bui, V., Nguyen, V. H., and Jang, Y. M. (2019). Low Power Wide Area Network Technologies for Smart Cities Applications. In *2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pages 501–505. IEEE.
- [Plafker and Ericksen, 1978] Plafker, G. and Ericksen, G. E. (1978). Nevados huascarán avalanches, peru. In *Developments in Geotechnical Engineering*, volume 14, pages 277–314. Elsevier.
- [Polonelli et al., 2019] Polonelli, T., Brunelli, D., Marzocchi, A., and Benini, L. (2019). Slotted ALOHA on LoRaWAN-design, analysis, and deployment. *Sensors (Switzerland)*, 19(4).
- [Portocarrero, 2014] Portocarrero, C. (2014). The Glacial Lake Handbook. Technical report, USAID, Washington D.C.
- [Qowisio,] Qowisio. Next generation IoT Solutions Maker.
- [Queralta et al., 2019] Queralta, J. P., Gia, T., Zou, Z., Tenhunen, H., and Westerlund, T. (2019). Comparative Study of LPWAN Technologies on Unlicensed Bands for M2M Communication in the IoT: beyond LoRa and LoRaWAN. *Procedia Computer Science*, 155(2018):343–350.
- [Quintero Londoño, 2020] Quintero Londoño, J. S. (2020). *Cálculo de retroceso para los glaciares Colombianos por medio de imágenes satelitales Sentinel 2 y MDT para el 2016 - 2017*. PhD thesis, Universidad de Manizales.
- [Raman and Chebrolu, 2007] Raman, B. and Chebrolu, K. (2007). Experiences in using WiFi for rural internet in India. *IEEE Communications Magazine*, 45(1):104–110.
- [Raza et al., 2017] Raza, U., Kulkarni, P., and Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 19(2):855–873.
- [Robson and Haddad, 2022] Robson, S. and Haddad, M. (2022). A chirp spread spectrum modulation scheme for robust power line communication. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(6):5299–5309.
- [Rubio-Aparicio et al., 2019] Rubio-Aparicio, J., Cerdan-Cartagena, F., Suardiaz-Muro, J., and Ybarra-Moreno, J. (2019). Design and Implementation of a Mixed IoT LPWAN Network Architecture. *Sensors*, 19(3):675.
- [Ruth, 2023] Ruth, C. (2023). The evolution of WI-Fi technology and standards. <https://standards.ieee.org/beyond-standards/the-evolution-of-wi-fi-technology-and-standards/>. Accessed: 2024-4-7.

- [Schmitt et al., 2015] Schmitt, C. G., All, J. D., Schwarz, J. P., Arnott, W. P., Cole, R. J., Lapham, E., and Celestian, A. (2015). Measurements of light-absorbing particles on the glaciers in the Cordillera Blanca, Peru. *Cryosphere*, 9(1):331–340.
- [Seminario-de Marzi, 2017] Seminario-de Marzi, B. (2017). Estimación del costo social por fallecimiento prematuro. Technical report.
- [Semtech, 2015] Semtech (2015). LoRa Modulation Basics AN1200.22. *App Note*, (May):1–26.
- [Semtech, 2022] Semtech (2022). *SX1276/77/78/79 Long Power Long Range Transceiver*.
- [Semtech, 2024] Semtech (2024). Technical guide to LoRaWAN and LoRa modulation. <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>. Accessed: 2024-9-18.
- [Sharma and Wang, 2020] Sharma, S. K. and Wang, X. (2020). Toward Massive Machine Type Communications in Ultra-Dense Cellular IoT Networks: Current Issues and Machine Learning-Assisted Solutions. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(1):426–471.
- [Shea, 2019] Shea, S. (2019). What is machine-to-machine (M2M)? <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/machine-to-machine-M2M>. Accessed: 2024-4-7.
- [Sigfox, 2024a] Sigfox (2024a). 0G NETWORK COVERAGE. <https://www.sigfox.com/coverage/>. Accessed: 2024-9-19.
- [Sigfox, 2024b] Sigfox (2024b). API documentation sigfox. <https://support.sigfox.com/docs/api-documentation>. Accessed: 2024-9-19.
- [Sigfox, 2024c] Sigfox (2024c). Radio configurations. <https://build.sigfox.com/sigfox-radio-configurations-rc>. Accessed: 2024-9-19.
- [Sigfox, 2024d] Sigfox (2024d). UnaBiz upgrades sigfox 0G technology, reducing device energy consumption by up to 18X. <https://www.sigfox.com/unabiz-upgrades-sigfox-0g-technology-reducing-device-energy-consumption-by-up-to-18>. Accessed: 2024-9-19.
- [Sigfox Company, 2020] Sigfox Company (2020). Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT).
- [Stokes, 2010] Stokes, G. G. (2010). *Lord RAYLEIGH*, page 99–125. Cambridge Library Collection - Physical Sciences. Cambridge University Press.
- [Suwarno et al., 2021] Suwarno, I., Ma’arif, A., Maharani Raharja, N., Nurjanah, A., Ikhsan, J., and Mutiarin, D. (2021). IoT-based lava flood early warning system with rainfall intensity monitoring and disaster communication technology. *Emerg. Sci. J.*, 4(0):154–166.
- [TelecomTV, 2020] TelecomTV (2020). Ericsson and Orange in Internet of Things trial with EC-GSM-IoT, IoT.

- [Terray et al., 2020] Terray, L., Royer, L., Sarramia, D., Achard, C., Bourdeau, E., Chardon, P., Claude, A., Fuchet, J., Gauthier, P.-J., Grimbichler, D., Mezhoud, J., Ogereau, F., Vandaële, R., and Breton, V. (2020). From sensor to cloud: An IoT network of radon outdoor probes to monitor active volcanoes. *Sensors (Basel)*, 20(10):2755.
- [Thethingsindustries, 2024a] Thethingsindustries (2024a). LoRaWAN network configuration. <https://www.thethingsindustries.com/docs/>. Accessed: 2024-9-18.
- [Thethingsindustries, 2024b] Thethingsindustries (2024b). Understanding LoRaWAN classes. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>. Accessed: 2024-9-18.
- [Thuro et al., 2020] Thuro, K., Singer, J., Menschik, B., Breuninger, T., and Gamperl, M. (2020). Development of an early warning system for landslides in the tropical Andes (Medellín; Colombia)Entwicklung eines Frühwarnsystems für Rutschungen in den tropischen Anden (Medellín, Kolumbien). *Geomechanics and Tunnelling*, 13(1):103–115.
- [Torres et al., 2018] Torres, C., Suárez, L., Schmitt, C., Estevan, R., and Helmig, D. (2018). Measurement of light absorbing particles in the snow of the Huaytapallana glacier in the central Andes of Peru and their effect on albedo and radiative forcing. *Optica Pura y Aplicada*, 51(4):1–14.
- [UNFCCC, 2019] UNFCCC (2019). Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, diciembre de 2019 | CMNUCC.
- [Vanhoef, 2017] Vanhoef, M. (2017). KRACK attacks: Breaking WPA2. <https://www.krackattacks.com/>. Accessed: 2024-4-7.
- [Vilímek et al., 2015] Vilímek, V., Klimeš, J., Emmer, A., and Benešová, M. (2015). Geomorphologic impacts of the glacial lake outburst flood from Lake No. 513 (Peru). *Environmental Earth Sciences*, 73(9):5233–5244.
- [Vinjosh Reddy et al., 2010] Vinjosh Reddy, S., Sai Ramani, K., Rijutha, K., Mohammad Ali, S., and Pradeep Reddy, C. H. (2010). Wireless hacking-a WiFi hack by cracking WEP. *ICETC 2010 - 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer*, 1.
- [Vishnevsky et al., 2014] Vishnevsky, V., Kozyrev, D., and Larionov, A. (2014). *Distributed Computer and Communication Networks*, volume 279 of *Communications in Computer and Information Science*. Springer International Publishing, Cham.
- [Vuille et al., 2018] Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Elison Timm, O., Condom, T., Salzmann, N., and Sicart, J. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead.
- [Vuille et al., 2008] Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., and Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4):79–96.

- [Wang et al., 2022a] Wang, S., Xie, A., and Zhu, J. (2022a). A wireless real-time continuous monitoring system for the internal movements of mountain glaciers using sensor networks. *Sensors (Basel)*, 22(23):9061.
- [Wang et al., 2022b] Wang, Y.-H., Chou, J.-H., and Lin, W.-J. (2022b). A 1024-element ku-band SATCOM phased-array transmitter with 39.2-dBW EIRP and ± 53 beam scanning. In *2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2022*, pages 943–946. IEEE.
- [Wegner, 2014] Wegner, S. (2014). *Lo que el agua se llevó: Consecuencias y Lecciones del Aluvión de Huaraz de 1941*. Ministerio del Ambiente, Huaraz, 1 edition.
- [Weightless,] Weightless. Setting the Standard for IoT.
- [Weyn et al., 2013] Weyn, M., Ergeerts, G., Wante, L., Vercauteren, C., and Hellinckx, P. (2013). Survey of the DASH7 Alliance Protocol for 433 MHz Wireless Sensor Communication. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(12):870430.
- [Yerrén-Suárez, 2021] Yerrén-Suárez, J. (2021). INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE ESTACIONES. Technical report.
- [Zamora-Maciél, 2018] Zamora-Maciél, A. (2018). Análisis y evaluación de una línea base geodésica implementando receptores de alta sensibilidad. Master’s thesis, Universidad Autonoma de Sinaloa, Mexico.
- [Zayas and Merino, 2017] Zayas, A. D. and Merino, P. (2017). The 3gpp nb-iot system architecture for the internet of things. In *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages 277–282.
- [Zemrane et al., 2019] Zemrane, H., Baddi, Y., and Hasbi, A. (2019). Ehealth smart application of WSN on WWAN. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Networking, Information Systems & Security - NISS19*, volume Part F1481, pages 1–8, New York, New York, USA. ACM Press.