

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Implementación de una red geofísica para la obtención de datos in situ para el estudio de la preparación de terremotos en la zona de subducción utilizando sensores de banda ancha-banda media y antenas GNSS en las regiones del sur del Perú

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Elaborado por

Alex Junior Gonzales Vasquez

 [0009-0004-9244-4369](https://orcid.org/0009-0004-9244-4369)

Asesor

M.Sc. Ing. Alfredo Efrain Rodríguez Gutiérrez

 [0000-0001-6246-049X](https://orcid.org/0000-0001-6246-049X)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Gonzales Vasquez [1]
Referencia/Reference	[1] A. Gonzales Vasquez, <i>“Implementación de una red geofísica para la obtención de datos in situ para el estudio de la preparación de terremotos en la zona de subducción utilizando sensores de banda ancha-banda media y antenas GNSS en las regiones del sur del Perú”</i> . [Trabajo de suficiencia profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Gonzales, 2025)
Referencia/Reference	Gonzales, A. (2025). <i>Implementación de una red geofísica para la obtención de datos in situ para el estudio de la preparación de terremotos en la zona de subducción utilizando sensores de banda ancha-banda media y antenas GNSS en las regiones del sur del Perú</i> . [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mis queridos padres, quienes con su incondicional apoyo y sus sabios consejos hicieron posible alcanzar este logro académico. A mi amada esposa y a mi querido hijo, quienes con su amor y compañía han sido mi refugio y motivación constante.

Agradecimientos

Gracias al magister Alfredo Rodríguez por su paciencia y orientación durante la elaboración del presente trabajo de investigación. Gracias al Instituto de Investigación para el Desarrollo por brindarme la oportunidad de formar parte del proyecto de investigación.

Resumen

En la actualidad estudiar la preparación de los terremotos en las zonas de subducción es un desafío fundamental para los especialistas en el campo de ciencia de la tierra, el sur del Perú al ser una zona altamente sísmica se convierte en área clave para este estudio. En el presente trabajo se describe la implementación de una red geofísica in situ instalada de manera temporal en el periodo comprendido entre noviembre del 2021 y diciembre del 2024 en los departamentos de Lima, Ica, Ayacucho, Huancavelica, Moquegua y Tacna. Esta red geofísica está conformada por 08 estaciones geodésicas y 24 estaciones sísmicas. En la implementación de las estaciones sísmicas se utilizan 11 sensores de velocidad de banda media (20s – 100Hz), 13 sensores de velocidad de banda ancha (120s – 150Hz) y 24 digitalizadores de la marca Nanometric. Además, se evalúa el nivel de ruido presente en las estaciones con un script desarrollado en Python según los modelos de Peterson. Las estaciones geodésicas están conformadas por una antena con sistema global de navegación por satélite (GNSS) de la marca Tallysman y un registrador de la marca Septentrio. Se concluye que la cantidad de datos registrados por red geofísica durante el periodo de noviembre del 2021 y diciembre del 2024 representa el 94% tanto para las estaciones sísmicas como para las estaciones geodésicas, el 6% restante corresponde a los datos perdidos por motivos externos a la instalación como robo de paneles solares o de la instrumentación sísmica.

Palabras clave — Red geofísica, estaciones geodésicas, estaciones sísmicas, sensores de velocidad, sistema global de navegación por satélite.

Abstract

Currently, studying earthquake preparation in subduction zones is a fundamental challenge for specialists in the field of earth science. Southern Peru, being a highly seismic zone, becomes a key area for this study. This work describes the implementation of an in situ geophysical network temporarily installed between November 2021 and December 2024 in the departments of Lima, Ica, Ayacucho, Huancavelica, Moquegua, and Tacna. This geophysical network is made up of 8 geodetic stations and 24 seismic stations. Eleven mid-band velocity sensors (20s - 100Hz), 13 broadband velocity sensors (120s - 150Hz), and 24 Nanometric brand digitizers are used in the implementation of the seismic stations. In addition, the noise level present at the stations is evaluated with a script developed in Python according to Peterson models. The geodetic stations consist of a Tallysman global navigation satellite system (GNSS) antenna and a Septentrio recorder. It is concluded that the amount of data recorded by the geophysical network during the period from November 2021 to December 2024 represents 94% for both seismic and geodetic stations. The remaining 6% corresponds to data lost due to reasons external to the facility, such as theft of solar panels or seismic instrumentation.

Keywords — Geophysical network, geodetic stations, seismic stations, velocity sensors, global navigation satellite system.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	3
1.2.1 Situación problemática	3
1.2.2 Problema a resolver	5
1.3 Objetivos del estudio	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.3.3 Indicadores de logro de los objetivos	6
1.4 Antecedentes investigativos.....	6
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	8
2.1 Marco teórico.....	8
2.1.1 Zona de subducción	8
2.1.2 Sismicidad en el Perú.....	10
2.1.3 Redes geofísicas	11
2.1.4 Sensores sísmicos	15
2.1.5 Sistema de energía en una estación geofísica.....	19
2.1.6 Modelo global de ruido sísmico.....	21
2.2 Marco conceptual	23
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	32
3.1 Introducción al desarrollo del trabajo de investigación.....	32
3.2 Instalación de estaciones de monitoreo geofísico en las regiones del sur del Perú.....	.33

3.2.1 Ubicación y nomenclatura de las estaciones geofísicas	33
3.2.2 Infraestructura de la red geofísica.....	37
3.2.3 Sistema de energía de la red geofísica	38
3.2.4 Instalación de estaciones geodésicas	42
3.2.5 Instalación de estaciones sísmicas.....	45
3.3 Nivel de ruido sísmico de las estaciones según los modelos de Peterson	48
3.4 Recolección de datos geofísicos	54
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	59
4.1 Cantidad de estaciones geofísicas instaladas.....	59
4.2 Análisis de ruido de las estaciones sísmicas 6B.PUVI y 6B.CRVP2.....	61
4.3 Disponibilidad de datos de la red geofísica	63
Conclusiones	65
Recomendaciones.....	67
Referencias bibliograficas	68
Anexos	72

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Indicadores de logro de los objetivos	6
Tabla 2: Coordenadas de las estaciones sísmicas	36
Tabla 3: Coordenadas de las estaciones geodésicas	36
Tabla 4: Consumo de potencia de la instrumentación sísmica	38
Tabla 5: Voltaje de baterías de las estaciones 6B.CANO, 6B.COYN y COYN.	41
Tabla 6: Comparación entre el sensor TC20PH y T120QA	46
Tabla 7: Periodos de datos disponibles de las estaciones sísmica	55
Tabla 8: Periodos de datos disponibles de las estaciones geodésicas	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Red geodésica existente en Sudamérica	1
Figura 2: Mapa sísmico del Perú 1960-2023	2
Figura 3 : Zona de acumulación de energía sísmica en el Perú	4
Figura 4: Sismos históricos ocurridos en la zona de subducción del Perú	9
Figura 5: Tipos de sismos que ocurren en zonas de convergencia de placas	10
Figura 6: Estaciones geodésicas de monitoreo permanente y temporal	12
Figura 7: Estación sísmica del Perú.....	15
Figura 8: Esquema de sismómetro mecánico.....	16
Figura 9: Esquema de sismómetro electromagnético	17
Figura 10: Sistema de coordenadas UVW y XYZ de un sismómetro triaxial simétrico .	18
Figura 11: Registro de una señal sísmica en sismómetros según su ancho de banda.....	19
Figura 12: Componente de un sistema fotovoltaico.....	21
Figura 13: Curvas de espectros de densidad espectral según Peterson (1993)	22
Figura 14: Placas tectónicas principales y secundarias en el mundo.	23
Figura 15: Señales sísmicas producida por eventos diferentes.	25
Figura 16: Registro de la onda P y S en una señal sísmica.	26
Figura 17: Ubicación del hipocentro y epicentro ante un evento sísmico.	27
Figura 18: Respuesta en frecuencia de sismómetro y acelerómetro.	28
Figura 19: Ubicación de las 08 estaciones geodésicas.....	34
Figura 20: Ubicación de las 24 estaciones sísmicas.	34
Figura 21: Infraestructura de la red geofísica.	37
Figura 22: Instalación de la estación geofísica PARA.	38
Figura 23: Controlador de carga MPPT 75/15.	40
Figura 24: Antena GNSS modelo VeraPhase de la marca Tallysman.....	42
Figura 25: Receptor GNSS modelo AsteRx SB ProConnect de la marca Septentrio....	42

Figura 26:	Instalación de antena GNSS de la estación geodésica ANMA.....	43
Figura 27:	Interfaz gráfica del receptor Septentrio de la estación geodésica ANMA.....	44
Figura 28:	Sensor de banda media Trillium compact 20s.	45
Figura 29:	Sensor de banda ancha Trillium 120.	45
Figura 30:	Instalación del sensor T120QA y del sensor TC20PH.....	47
Figura 31:	Digitalizador centaur3.	47
Figura 32:	Estado general de la estación sísmica CANO.....	48
Figura 33:	Análisis de ruido de estaciones con sensores de banda media.	49
Figura 34:	Análisis de ruido de estaciones con sensores de banda ancha.	51
Figura 35:	Señal sísmica registrada por la estación 6B.ANMA.....	57
Figura 36:	Interfaz web del software FileZilla.....	58
Figura 37:	Cantidad de estaciones geofísicas instaladas en el sur del Perú.....	59
Figura 38:	Carga y descarga de la batería de las estaciones sísmicas y geodésica 6B.CANO, 6B.COYN y COYN del día 30/07/2022.....	60
Figura 39:	Análisis de ruido de la estación sísmica 6B.PUVI.....	62
Figura 40:	Análisis de ruido de la estación sísmica 6B.CRVP2	62
Figura 41:	Porcentaje de datos disponibles de las estaciones sísmicas	63
Figura 42:	Porcentaje de datos disponibles de las estaciones geodésica.....	64

Introducción

El presente trabajo se enfocará en la implementación de una red geofísica en las regiones del sur del Perú la cual permita obtener datos sísmicos que ayuden a entender a especialistas en el campo de ciencia de la tierra la preparación de los terremotos en la zona de subducción.

En el capítulo I, se realiza una introducción de la sismicidad en la zona de subducción y como ha sido afectado el sur del Perú durante los últimos años.

En el Capítulo II, se desarrolla el marco teórico y conceptual los cuales nos brindarán la información necesaria que se debe conocer durante la implementación de la red geofísica.

En el capítulo III, se describe el proceso de implementación de la red geofísica. Asimismo, se menciona las características principales de la instrumentación sísmica. Además, se muestra el análisis de nivel de ruido de las estaciones sísmicas que no cumplen con los límites establecidos por Peterson y que posteriormente son reubicado.

En el capítulo IV, se muestran la cantidad de estaciones instaladas y la disponibilidad de datos obtenidos durante el despliegue de la red geofísica. Además, se muestra los nuevos niveles de ruido de las estaciones sísmicas reubicadas.

Asimismo, en los anexos se muestran las fichas técnicas de los equipos utilizados durante este trabajo.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

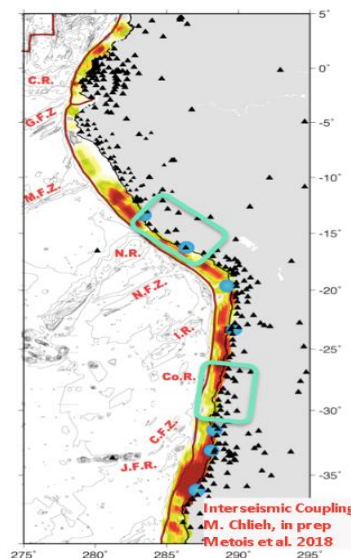
1.1 Generalidades

La sismicidad en las zonas de subducción es una de las principales fuentes de amenaza sísmica en el mundo (Nixon, 1982). Las zonas de subducción albergan los terremotos más grandes y los tsunamis asociados, pero se sabe muy poco sobre cómo se preparan estos terremotos. Comprender cómo se preparan e interactúan estos terremotos es un desafío de primer orden en las ciencias de la Tierra (OSUG, 2025).

En la actualidad, no se cuenta con observaciones estadísticamente significativas de las interacciones entre la deformación lenta y la sismicidad en el gran sistema de subducción (OSUG, 2025). La comunidad de científicos de ciencia de la Tierra, busca analizar conjuntamente los datos geodésicos y sismológicos de los terremotos ocurridos en Sudamérica, así mismo de instalar estaciones geodésicas y sismológicas en áreas clave de Chile y Perú (OSUG, 2025). En la figura 1 se muestra la red geodésica existente en Sudamérica y las dos zonas de interés donde se realizará la instrumentación geofísica en marco del proyecto se indican de color verde.

Figura 1

Red geodésica existente en Sudamérica



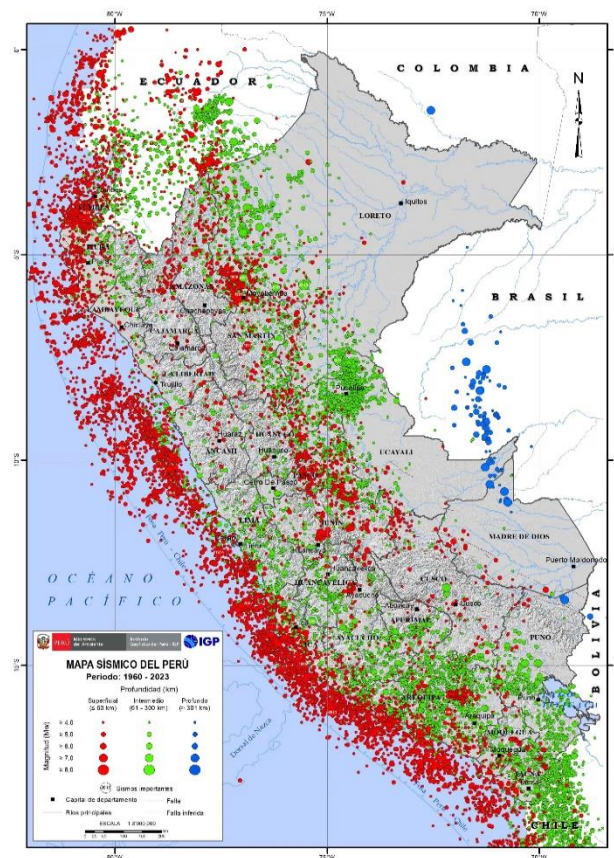
Nota: adaptado de OSUG (2025).

El sur de Perú (13°S-17°S) ha sido parcialmente afectado por el terremoto de Arequipa de 2001, de magnitud 8,4, ha sido cargado en ambos extremos por el terremoto de Pisco, de magnitud 8 en 2007 en el área de la dorsal de Nazca, y por el terremoto de Iquique, de magnitud 8,3 en 2014 en el norte de Chile. Esta área parece ser un excelente objetivo para la búsqueda de interacciones entre profundidades y superficies, fenómenos transitorios de gran escala y eventos de deslizamiento lento en áreas de bajo acoplamiento, en particular en el área de la dorsal de Nazca, donde podemos esperar detectar pequeños eventos de deslizamiento lento y un potencial gran terremoto en el futuro (OSUG, 2025).

En la figura 2 se muestra el mapa sísmico del Perú donde la mayor concentración de eventos ocurre en las regiones del sur del Perú.

Figura 2

Mapa sísmico del Perú 1960-2023



Nota: tomado de IGP (2025).

En las últimas dos décadas, los instrumentos y herramientas de geodesia espacial, en particular el Sistema Global de Posicionamiento por Satélite (GNSS), han contribuido a

mejorar el conocimiento y comprensión de los diferentes procesos geofísicos asociados al ciclo sísmico en sus distintas fases: antes, durante y después de los terremotos. Hoy, las mediciones geodésicas GNSS permiten cuantificar el desplazamiento de un punto sobre la superficie de la Tierra con un nivel de precisión por debajo de un milímetro (Villegas, 2020).

Las estaciones sismológicas permiten registrar y almacenar datos asociados a los eventos sísmicos. Estas estaciones nos permiten mapear la deformación lenta en las zonas de subducción mediante la detección y caracterización de terremotos de baja frecuencia.

1.2 Descripción del problema de investigación

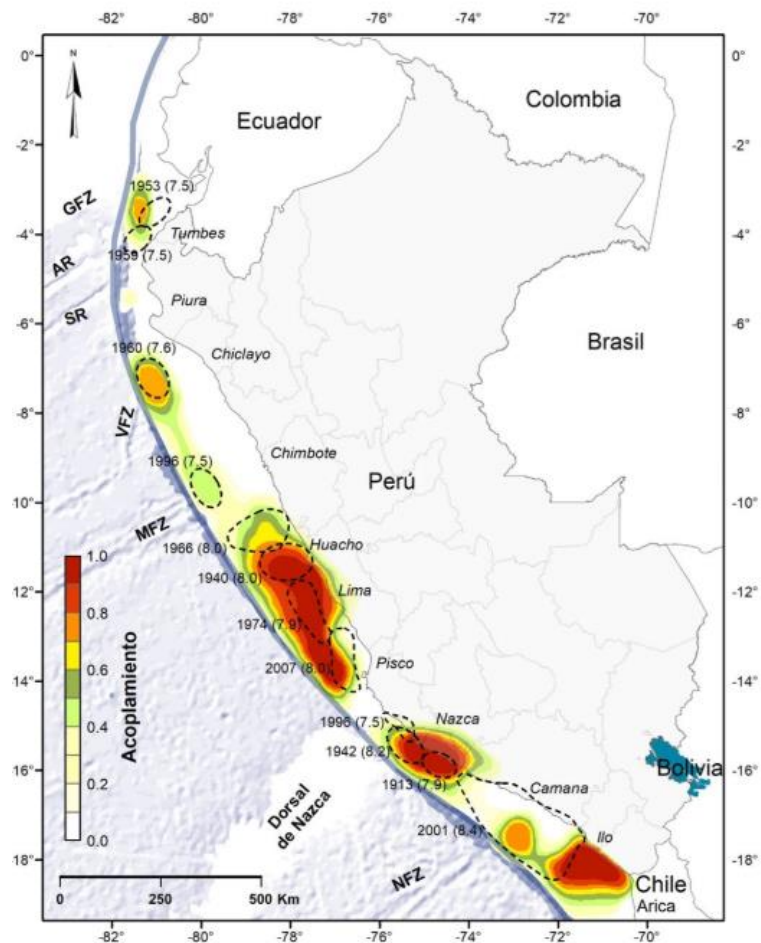
1.2.1 Situación problemática

La comunidad científica que estudia la ciencia de la Tierra, conoce muy poco sobre la preparación e interacción de los terremotos en las zonas de subducción. Comprender este proceso de preparación, puede ayudar a identificar señales precursoras de terremotos, lo cual es esencial para desarrollar sistemas de alerta temprana y reducir el impacto de estos eventos naturales.

El Perú se encuentra ubicado frente a una zona de subducción donde la placa oceánica de Nazca se desliza por debajo de la placa continental Sudamericana, generando un gran número de terremotos de distintas magnitudes a diferentes niveles de profundidad. En los últimos años, la zona sur del Perú ha sido afectada por el terremoto de Arequipa M8.1 en el 2001 e Ica M8.0 en el 2007. Esta ubicación geográfica, la ocurrencia de terremotos y la acumulación de energía sísmica como se muestra en la figura 3, de color rojo, convierte al sur del Perú como área clave para comprender la preparación de los terremotos originados en las zonas de subducción.

Figura 3

Zona de acumulación de energía sísmica en el Perú



Nota: tomado de IGP (2025).

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) es el ente encargado de implementar la red geofísica nacional que permita monitorear y realizar diferentes estudios de investigación de la actividad sísmica en el Perú; sin embargo, el elevado costo que implica la instrumentación sísmica y su posterior mantenimiento dificulta la densificación de la red sísmica nacional. Para el estudio a realizar por la comunidad científica de ciencia de la Tierra, se requiere la disponibilidad del mayor número de datos geodésicos y sismológicos. Es por ello que este proyecto, en colaboración con el IGP, busca instalar de manera temporal estaciones geodésicas y sismológicas en áreas estratégicas del sur del Perú, teniendo en cuenta el costo que con lleva la instalación y puesta en marcha de la instrumentación sísmica. El conjunto de datos obtenidos permitirá tener una mayor comprensión de la preparación de los terremotos ocurridos en la zona de subducción.

1.2.2 Problema a resolver

No se cuenta con una red geofísica propia en las regiones del sur para estudiar la preparación de terremotos en la zona de subducción.

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Implementar una red geofísica en las regiones del sur del Perú para la obtención de datos *in situ* para el estudio de la preparación de terremotos en la zona de subducción utilizando sensores de banda ancha-banda media y antenas GNSS.

1.3.2 Objetivos específicos

- Instalar estaciones de monitoreo geofísico en zonas estratégicas de las regiones del sur del Perú.
- Obtener el nivel de ruido sísmico de las estaciones sismológicas dentro del modelo de bajo nivel de ruido (NLNM) y el modelo de alto nivel de ruido (NHNM).
- Recolectar datos geofísicos que permitan identificar patrones y señales precursoras de terremotos.

1.3.3 Indicadores de logro de los objetivos

Tabla 1

Indicadores de logro de los objetivos

Objetivo específico	Indicador de logro	Métrica
Instalar estaciones de monitoreo geofísico en zonas estratégicas de las regiones del sur del Perú.	Número de estaciones geofísicas	Cantidad
Obtener el nivel de ruido sísmico de las estaciones sismológicas dentro del modelo de bajo nivel de ruido (NLNM) y el modelo de alto nivel de ruido (NHNM).	Densidad espectral de potencia	dB
Recolectar datos geofísicos que permitan identificar patrones y señales precursoras de terremotos.	Cantidad de datos geofísicos	Porcentaje

1.4 Antecedentes investigativos

Los países altamente sísmicos a través de los años vienen implementando nuevas tecnologías y mejoras a sus redes geofísicas. Haendel (2013) propone un diseño completo de la red sísmica digital por satélite haitiana con el objetivo de ampliar la cobertura de monitorización sísmica en todo Haití y tener un centro de control propio. El Observatorio Nacional de Medio Ambiente y de la Vulnerabilidad (ONFV) adquirió 04 estaciones sísmicas con transmisión satelital de la marca Nanometric. El presente trabajo de investigación aporta con la configuración de la instrumentación sísmica, así como del sistema de comunicación satelital con el centro de control mediante el uso del sistema de transmisión Libra de Nanometric y los softwares de adquisición y procesamiento de datos sísmicos Apollo y SeisComp3.

Un estudio realizado por Tanaka y Yamamoto (2018) señaló que su instrumentación geofísica existente no era suficiente para cubrir las áreas de riesgo en Japón, demostró que una red geofísica bien establecida puede proporcionar datos con mayor precisión para la predicción de terremotos. Sin embargo, Brown et al. (2019) nos comentan los desafíos que conlleva implementar una red geofísica, considerando la necesidad de tecnología y los altos costos de la misma. En algunos casos, la seguridad de los costosos equipos condiciona a realizar la instalación en lugares poco estratégicos para los estudios a realizar.

Audemard et. al. (2020) propusieron instalar estaciones geodésicas permanentes que serán estratégicamente ubicadas para densificar la red de observación de operaciones continua GPS del Caribe (COCONet). Estas estaciones permitirán comprender mejor la geodinámica local y regional con implicaciones importantes en el estudio de la amenaza sísmica.

Mamani (2021) tuvo como objetivo analizar los niveles de ruido sísmico presentes en las estaciones sísmicas de banda ancha de la red sísmica nacional, para luego determinar los límites mínimos y máximos que siguen la tendencia del ruido presente. Los datos sísmicos fueron analizados usando la función de probabilidad de la potencia del espectro de densidad, en base a la metodología utilizada por Peterson. A partir de los resultados se pudo determinar que el límite mínimo establecido es mayor en 18 dB al límite mínimo global. Esto debido a la instalación superficial de los sismómetros de la red sísmica nacional y los periodos largos tienen valores de 7 dB por encima del límite máximo global.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Zona de subducción

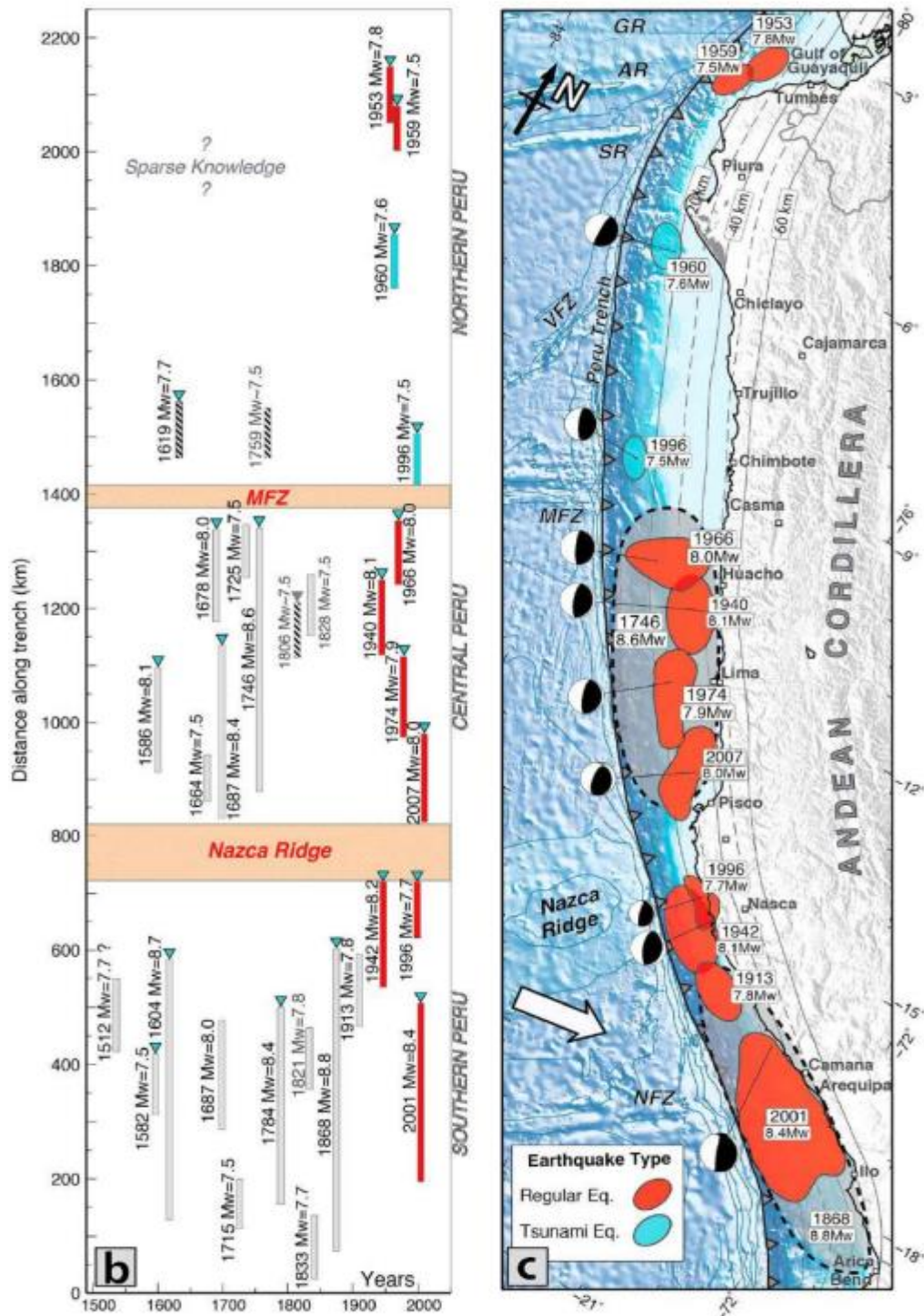
Se llama zona de subducción a la región de la corteza terrestre donde una placa tectónica se desliza debajo de otra, sumergiéndose en el manto terrestre. En las placas tectónicas es fundamental este proceso y se relaciona con la formación de montañas, terremotos y volcanes (Smith & Jones, 2020).

El Perú está geográficamente ubicado frente a una zona de convergencia donde la placa oceánica de Nazca se desliza por debajo de la placa continental Sudamérica. Según Villegas (2020), esta zona de convergencia se divide en 3 regiones. Estas son la región norte, comprendida desde Tumbes hasta la fractura de Mendaña; la región centro, delimitada por la fractura de Mendaña y la dorsal de Nazca; y la región sur, desde la dorsal de Nazca hasta el codo de Arica.

En la figura 4, se muestra la distribución de sismos históricos ocurridos en las tres regiones frente a la zona de subducción del Perú.

Figura 4

Sismos históricos ocurridos en la zona de subducción del Perú



Nota: tomado de Villegas et al. (2020)

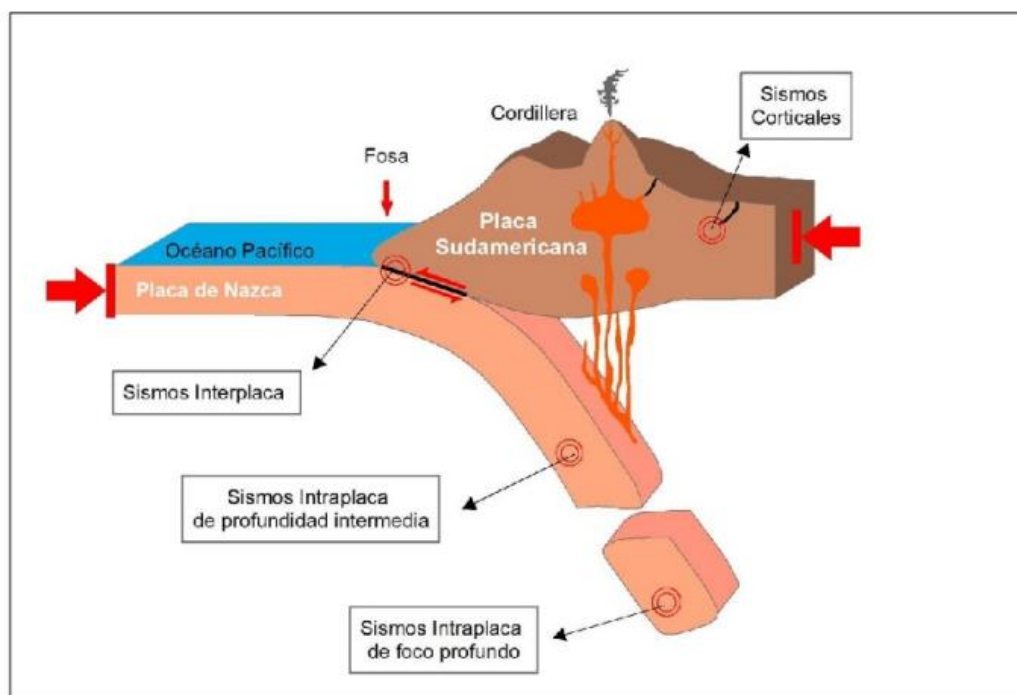
2.1.2 Sismicidad en el Perú

El Perú es uno de los países que forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, lo cual lo convierte en un país altamente sísmico. La actividad sísmica en el Perú se origina por el deslizamiento de la placa oceánica de Nazca sobre la placa continental sudamericana. Este deslizamiento se realiza con velocidades promedio de 7–8 cm/año (Tavera, 2020).

Según Tavera (2020), los sismos en el Perú se pueden agrupar en los siguientes: sismos interplaca, originando los sismos de mayor magnitud ocurridos en el Perú en los años 1746 (Lima, M8.8), 1868 (Arequipa, M8.8), 2001 (Arequipa, M8.2) y 2007 (M8.0); sismos corticales, que tienen origen en la formación y reactivación de fallas geológicas distribuidas a lo largo de la cordillera; como último grupo están los sismos intraplaca, que se originan en la deformación de la placa de Nazca cuando se desliza por debajo de la placa continental. Estos tipos de sismos se muestran en la figura 5.

Figura 5

Tipos de sismos que ocurren en zonas de convergencia de placas



Nota: tomado de Tavera (2020).

2.1.3 Redes geofísicas

Son sistemas diseñados para monitorear y analizar fenómenos como terremotos, campos magnéticos y variaciones gravitacionales. Una red geofísica puede incluir sismómetros, magnetómetros, gravímetros y otros dispositivos que recopilan datos para estudiar las propiedades físicas de la tierra. Según Lay y Wallace (1995), las redes geofísicas son esenciales para la comprensión de la estructura interna de la Tierra y para la predicción de eventos naturales como terremotos y erupciones volcánicas.

En el Perú, por ser un país altamente sísmico, a través del Instituto Geofísico del Perú, se ha implementado dos tipos de redes geofísicas, la red geodésica y red sísmica, a nivel nacional para el monitoreo constante de la sismicidad en el país.

La red geodésica es un conjunto de estaciones y/o puntos distribuidos sobre la superficie terrestre de una determinada región, ubicados estratégicamente en lugares que reúnen condiciones de seguridad y permanencia. Además, tiene un horizonte libre de obstrucciones sobre los cuales se realizan mediciones permanentes y/o temporales. Las redes geodésicas constituyen los cimientos sobre los que se apoyan multitud de disciplinas tanto científicas como técnicas y son imprescindibles para el estudio teórico de la forma y figura de la Tierra (Villegas, 2020).

El funcionamiento de las redes geodésicas se basa en el sistema de posicionamiento satelital, que obtiene datos de la posición de un lugar varias veces por segundo. Con estos datos es posible obtener registros de desplazamientos producidos por ondas sísmicas provenientes de grandes terremotos.

Una estación geodésica esta instrumentada por una antena GNSS, la cual es la encargada de recibir y amplificar la señal GPS, el receptor, donde se almacena la señal de los satélites captada por la antena, sistema de energía como paneles solares y baterías. Además, forman parte de la estación elementos auxiliares como trípode, bases nivelante y marcadores de acero (Villegas, 2020).

En la figura 6, se muestra dos tipos de estaciones geodésica que utiliza el Instituto Geofísico del Perú. En una se observan las estaciones de monitoreo permanente y la otra

es una estación de campaña (temporal), la cual realiza la medición por un periodo de 03 días como máximo.

Figura 6

Estaciones geodésicas de monitoreo permanente y temporal



Nota: tomado de Villegas (2020). En la imagen se observa una estación de monitoreo permanente a la izquierda y una estación temporal a la derecha.

La red sísmica es un conjunto de estaciones sismológicas distribuidas geográficamente con la finalidad de detectar, registrar y analizar la actividad sísmica en una región específica. Estas redes permiten la recolección de datos de eventos sísmicos, que son de gran ayuda para la investigación científica y para la implementación de medidas de prevención y mitigación de desastres. (Red Sísmica de Puerto Rico, 2025). Antes de la década de 1960, las estaciones sísmicas registraban señales de manera local y las enviaban posteriormente a centros especializados para su análisis. Cuando varias estaciones operaban de forma conjunta en un país o región, constituían lo que se conocía como una red sísmica; sin embargo, debido a las limitaciones en las comunicaciones, los datos no se transmitían en tiempo real, lo que dificultaba la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana. La situación comenzó a mejorar con el uso de transmisiones por radio, permitiendo que los registros fueran recibidos casi instantáneamente y dando paso al desarrollo de sistemas sísmicos modernos y más eficientes (Trnkoczy & Havskov, 2011).

La ubicación de una estación sísmica requiere de estudios preliminares antes de definir una posible ubicación. Esto debido a que la información recolectada sea de calidad y no presente interferencias por algún factor externo a lo largo de su funcionamiento. Trnkoczy y Havskov (2011) describen algunas consideraciones mínimas a tener en cuenta al momento de instalar una estación sísmica:

- **Región geográfica de interés.** Para definir si una red sísmica debe enfocarse a nivel local o regional, es fundamental contar con información sísmica y geológica. Estos datos, junto con el conocimiento de la sismotectónica del área, permiten entender mejor el comportamiento sísmico de la región.
- **Topografía.** Es importante ubicar las estaciones sísmicas en lugares con relieve moderado, ya que en zonas elevadas como montañas son más propensas a registrar ruido sísmico generado por el viento y tormentas eléctricas. Además, si se planea utilizar comunicación por radiofrecuencia, es necesario considerar la elevación del sitio, ya que estas señales requieren líneas de vista despejadas para evitar interferencias.
- **Acceso a las estaciones.** Se requiere instalar una estación sísmica en lugares alejados de fuentes de ruido asociadas a la actividad humana. Esto permite una buena calidad de datos, sin embargo pueden presentar desafíos logísticos y mayores costos de instalación y mantenimiento de las estaciones sísmicas. Para planificar adecuadamente el acceso, se pueden utilizar mapas viales existentes y herramientas como imágenes satelitales, que ofrecen una visión útil del terreno y las rutas posibles.
- **Evaluación de fuentes de ruido sísmico.** La identificación de fuentes de ruido sísmico, tanto naturales como artificiales, constituye una etapa inicial fundamental en cualquier estudio de caracterización sísmica. Posteriormente, es necesario realizar mediciones de campo para cuantificar dicho ruido.
- **Transmisión de datos sísmicos y fuentes de energía.** Es fundamental considerar el método de transmisión de datos, ya sea mediante radiofrecuencia, internet o

enlaces satelitales. Además, una red sísmica requiere de una fuente de energía adecuada. Si no existe acceso a la red eléctrica, es necesario utilizar alternativas como baterías recargables o, preferentemente, fuentes renovables como paneles solares o turbinas eólicas, especialmente en ubicaciones remotas donde el mantenimiento es limitado y el acceso restringido.

- **Uso futuro del terreno y propietario.** Es importante determinar si el sitio pertenece a un propietario privado o si existen planes de desarrollo futuro, como actividades agrícolas, construcción de carreteras o proyectos mineros.
- **Condiciones climáticas.** Es un factor importante, a la hora de seleccionar la ubicación para una estación sísmica, conocer los parámetros como temperatura, radiación solar, precipitación y protección contra rayos; pues permiten estar preparados y diseñar medidas de protección de la instrumentación sísmica garantizando un funcionamiento óptimo.

Según Havskov et. al. (2012), la implementación de una red sísmica permite determinar la localización y magnitud de los terremotos, generar alertas sísmicas, monitorear la actividad sísmica de un determinado país y, en el ámbito de la investigación, comprender la estructura interna de la tierra.

Una estación sísmica esta instrumentada por un sensor sísmico, encargado de captar el movimiento del suelo, un registrador, cuya función es la señal analógica captado por el sensor y convertir en señal digital para luego ser almacenado, antena gps, la cual brinda el tiempo preciso al registrador, y el sistema de energía como paneles solares y baterías, que mantienen a la estación sísmica encendida (Haendel, 2013).

En la figura 7 se muestra la implementación de una estación sísmica del Perú por parte del Instituto Geofísico del Perú.

Figura 7

Estación sísmica del Perú



Nota: tomado del Instituto Geofísico del Perú (2025)

2.1.4 Sensores sísmicos

Según Havskov y Alguacil (2004), los sensores sísmicos captan el desplazamiento, velocidad o aceleración del suelo que mediante un transductor se representan en voltajes. Los sensores sísmicos tienen una masa, la cual se mueve en respuesta a la aceleración del suelo en relación a un plano de referencia.

Según Wielandt (2002), los sensores, que utilizan el principio de inercia y miden el movimiento relativo del suelo respecto a una masa suspendida, son los adecuados para medir los movimientos originados por eventos sísmicos y se clasifican en sismómetros mecánicos, sismómetros electromagnéticos y sismómetro triaxial.

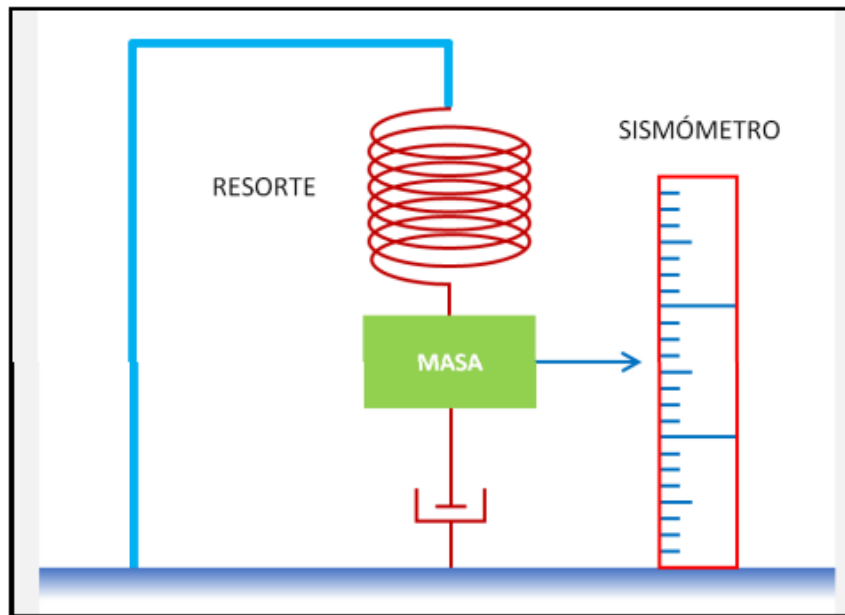
Según Havskov y Alguacil (2004), el sismómetro mecánico es el tipo de sensor basado en una masa suspendida, la cual tiende a permanecer en su punto de origen cuando ocurra algún tipo de movimiento externo.

En la figura 8, se muestra el esquema de un sismómetro mecánico el cual mide el movimiento vertical del suelo. Este tipo de sismómetro consiste en una masa suspendida por un resorte, cuyo movimiento es controlado para que no exceda la frecuencia de

resonancia, una regla es adicionada a la derecha para representar en forma gráfica el desplazamiento vertical de la masa ante un eventual movimiento de la tierra.

Figura 8

Esquema de sismómetro mecánico



Nota: tomado de Havskov y Alguacil (2002).

La ecuación 1 define la función de respuesta en frecuencia de desplazamiento:

$$T_d(w) = \frac{w^2}{w_0^2 - w^2 + i2ww_0h} \quad (1)$$

Donde

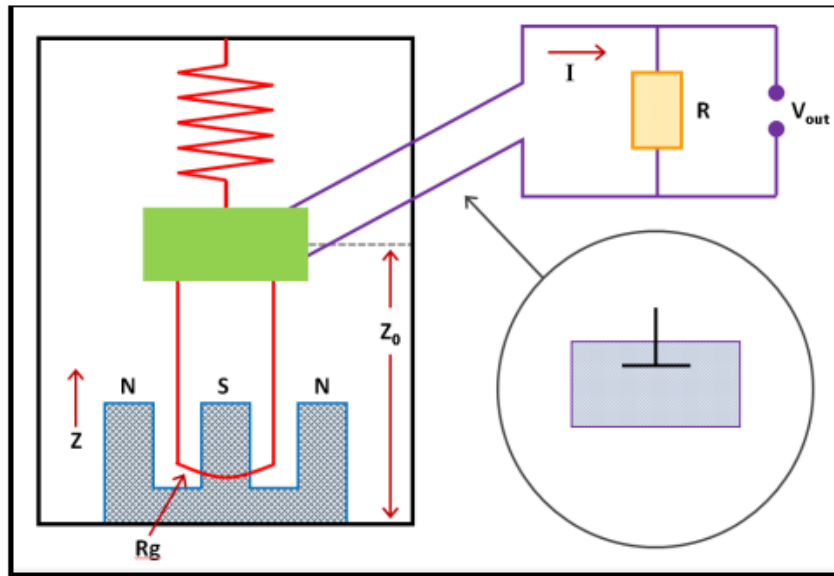
- w_0 : frecuencia de amortiguamiento constante.
- w : frecuencia angular del sistema.
- h : fuerza de amortiguamiento constante.

Los sismómetros electromagnéticos son conocidos como sismómetros de transductores de velocidad. Siguen el mismo principio de los sismómetros inerciales, ya que miden el movimiento de una masa respecto al movimiento del terreno. Este se basa en tener una bobina dentro en un campo magnético que se mueve con la masa. El factor de salida de la bobina es proporcional a la velocidad de la masa en relación con un plano de referencia, por lo tanto, ocurre un proceso de transducción de velocidad (Havskov & Alguacil, 2004).

En la figura 9, se muestra un modelo de un sensor electromagnético, que a diferencia de un sismómetro mecánico realiza el amortiguamiento a través de una bobina móvil en un campo magnético. Según Medina (2016), la corriente inducida generada por la bobina móvil genera una fuerza electromagnética proporcional que se opone al movimiento de la masa.

Figura 9

Esquema de sismómetro electromagnético



Nota: tomado de Mamani (2021).

La ecuación 2 define la función de respuesta en frecuencia para un sensor electromagnético:

$$T_d^v = \frac{iGw^3}{w_0^2 - w^2 + i2ww_0h} \quad (2)$$

Donde:

- w_0 : Frecuencia de amortiguamiento constante.
- w : Frecuencia angular del sistema.
- h : Fuerza de amortiguamiento constante.
- G : Responsividad del transductor.

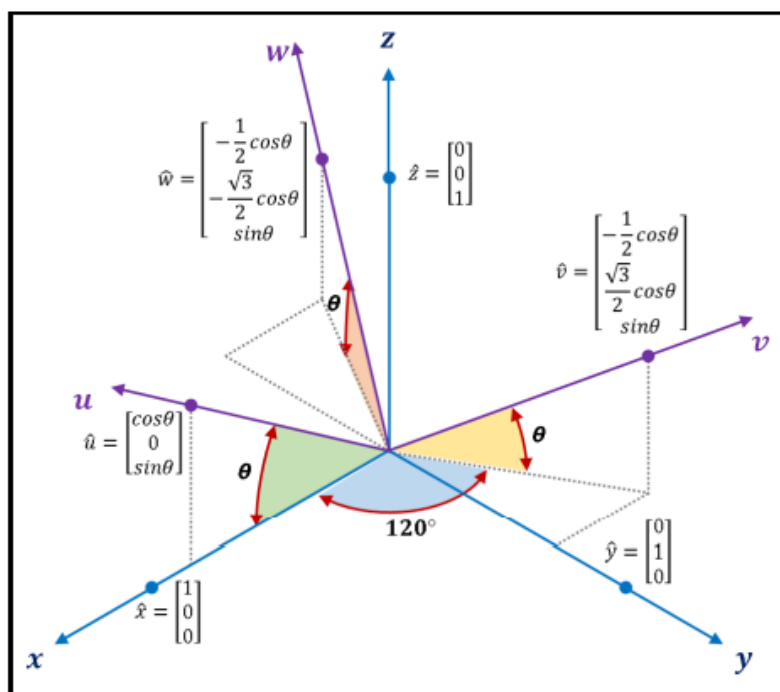
El sismómetro triaxial entrega tres señales en la salida, representado de forma ortogonal el movimiento del suelo en las direcciones norte, este y vertical (X, Y, Z) del sismómetro (Mamani, 2021).

Según Townsend (2014), la constante de aceleración de gravedad solo actúa en la dirección vertical implicando diferentes condiciones para la medida en las direcciones ortogonales. Por ello, Galperin (1955), citado por Townsend (2014), propone la rotación ortogonal de los ejes del sensor desde un plano de referencia XYZ a una orientación donde los tres ejes sean inclinados con el mismo ángulo respecto a un plano horizontal.

En la figura 10 se muestra el arreglo ortogonal de un sismómetro triaxial simétrico, donde las nuevas direcciones UVW están superpuestas sobre XYZ generando un nuevo sistema de coordenadas.

Figura 10

Sistema de coordenadas UVW y XYZ de un sismómetro triaxial simétrico



Nota: adaptado de Townsed (2014)

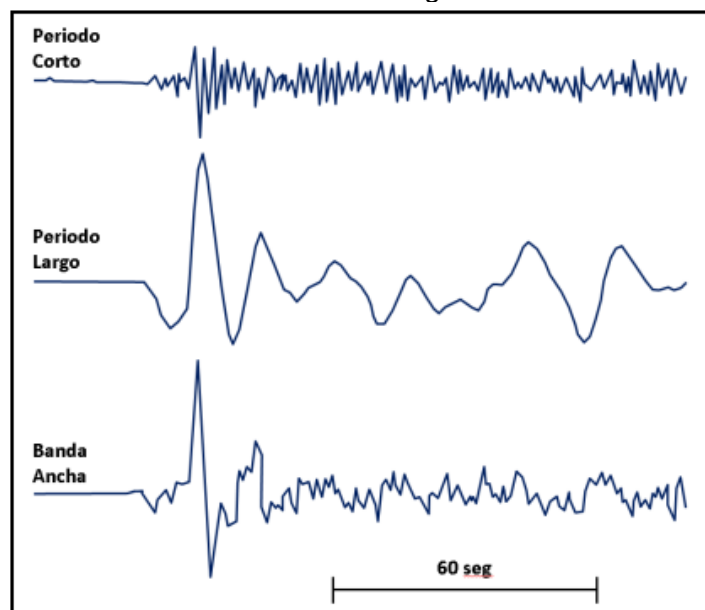
Según Jaiswal y Mistra (2008), según el ancho de banda los sismómetros se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Sismómetro de periodo largo.** Registra señales con frecuencias entre 0.01 a 0.1 Hz. Este tipo de sismómetro brinda información acerca de estudios de sismos regionales.
- **Sismómetro de periodo corto.** Registra señales de frecuencias entre 1 a 10 Hz. Este tipo de sismómetro se usa para estudio de sismos locales.
- **Sismómetro de banda ancha.** Registra señales de frecuencias entre 0.01 a 10Hz. Este tipo de sismómetro se usa para estudio de sismicidad local, regional y tele sísmica.

La figura 11 muestra el registro de una señal sísmica correspondiente a los tipos de sismómetro de acuerdo a su ancho de banda.

Figura 11

Registro de una señal sísmica en sismómetros según su ancho de banda



Nota: tomado de Jaiswal (2014).

2.1.5 Sistema de energía en una estación geofísica

Las estaciones geofísicas en su mayoría se encuentran ubicadas en lugares con difícil acceso a una línea de transmisión eléctrica cercana, por ende, se opta por una fuente de energía proveniente de un medio natural como la energía solar. Desde el punto de vista energético las estaciones son autónomas y están conformadas por paneles solares,

controladores de carga y un banco de batería. La combinación de estos elementos garantiza la operatividad sin interrupción de las estaciones geofísicas.

Según Orbegozo y Arivilca (2010) la energía solar es aquella energía obtenida de la radiación producida en el sol, llegando a la Tierra en paquetes de energía llamados fotones. Estos fotones son absorbidos por un material conductor llamado celda solar liberando un electrón dentro de ella y así generando una corriente eléctrica. A este proceso se le llama efecto fotovoltaico.

Los sistemas solares fotovoltaicos están conformados por los siguientes componentes:

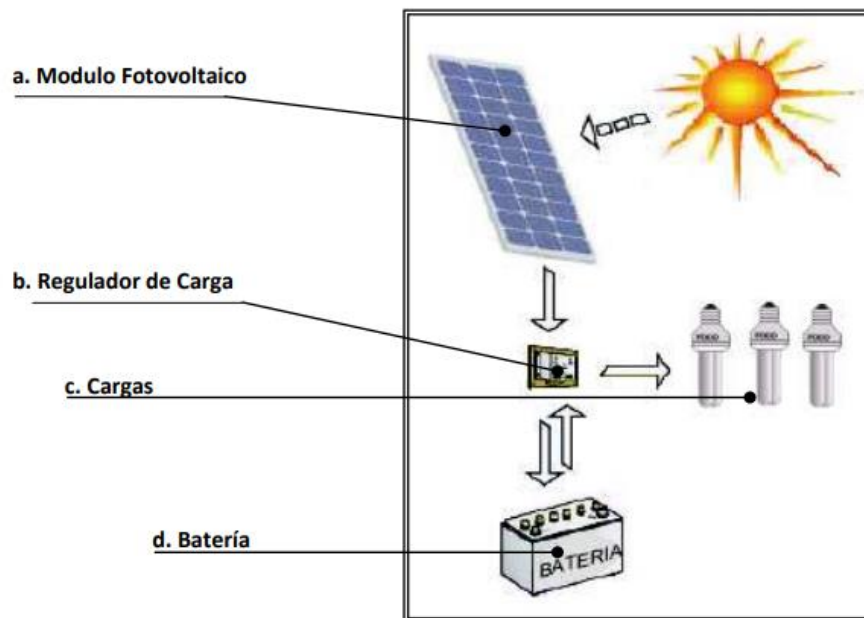
- **Panel solar fotovoltaico.** Es un conjunto de celdas solares encargadas de convertir la radiación solar en electricidad. La corriente que se produce en un módulo fotovoltaico es corriente continua generalmente a un voltaje de 12v, 24v o 48v dependiendo del sistema a instalar. Los paneles solares fotovoltaicos son de dos tipos: los monocristalinos; tienen apariencia negra y recortadas en las esquinas de sus celas, este tipo de paneles destacan por su rendimiento y eficiencia. El segundo tipo de panel solar es el policristalino; en su mayoría son de color azul y con las esquinas rectas en cuanto a su rendimiento y eficiencia es menor que los de tipo monocristalino (Orbegozo & Arivilca, 2010).
- **Controlador de carga.** Es un componente electrónico que se encarga de dirigir y controlar la sobrecarga y descarga de las baterías, de esta manera prolongando su vida útil (Orbegozo & Arivilca, 2010). Los controladores de carga de tipo PWM realizan una modulación por pulsos y únicamente realizan el corte de energía entre panel solar y batería cuando esta se ha cargado completamente. Este tipo de controlador hace que la batería y el panel solar trabajen a la misma tensión desaprovechando la máxima capacidad de los paneles. Otro tipo de controlador es el MPPT el cual aprovecha la máxima capacidad del panel solar para cargar la batería esto debido a que incluye un convertidor de tensión CC-CC.

- **Batería solar.** Este componente tiene como función almacenar la energía generada por los paneles solares y suministrarla a los equipos cuando la necesiten (Orbegozo & Arivilca, 2010).

En la figura 12 se muestra el esquema de los componentes de un sistema fotovoltaico.

Figura 12

Componente de un sistema fotovoltaico



Nota: adaptado de Orbegozo y Arivilca (2010)

2.1.6 Modelo global de ruido sísmico

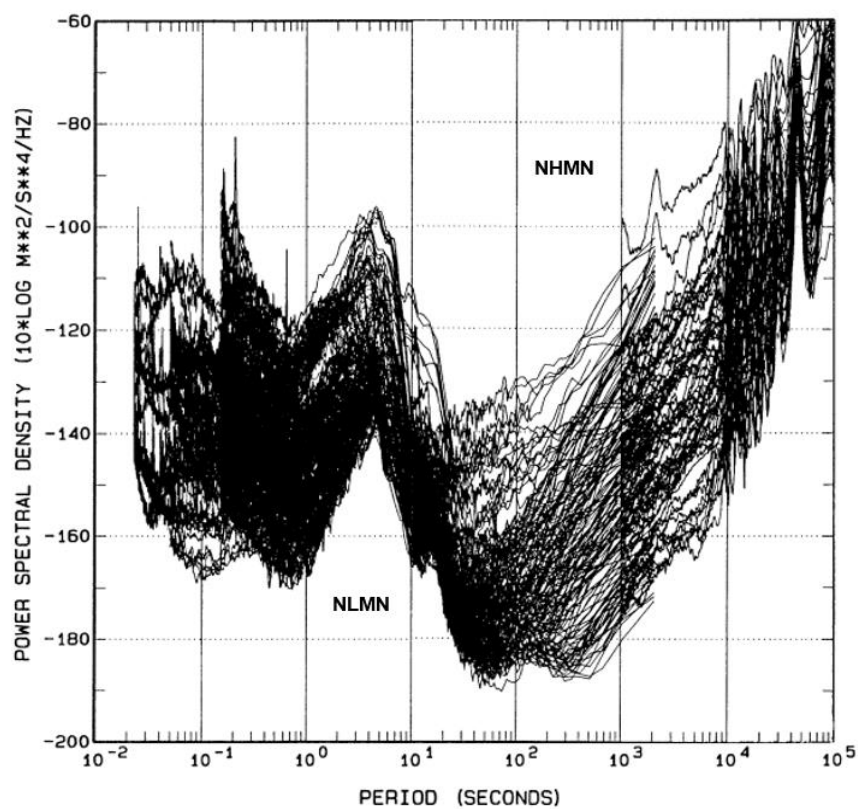
Peterson (1993) presenta un modelo global del ruido sísmico para una banda de frecuencia de 10^{-5} a 10^2 Hz. En este modelo se representa el nivel máximo y mínimo, desarrollado por la representación de densidades espectrales de potencia de aceleración de registros con periodos ruidoso y no ruidosos de las 780 estaciones de la red sísmica mundial.

El modelo para el nivel máximo de ruido se conoce como New High Noise Model (NHNM) y para el nivel bajo de ruido New Low Noise Model (NLNM), ambos modelos representan los límites de ruidos que debe presentar una estación sísmica (Mamani, 2021).

En la figura 13 se presenta las curvas de densidad espectral de potencia (PSD) de las estaciones estudiadas por Peterson en 1993. La curva del modelo NLNM se obtiene del registro de estaciones con sismómetro triaxiales que están instalados sobre roca dura y alejados de fuentes de ruido natural o artificial. La curva del modelo NHNM es la representación del promedio de ruido en las estaciones instaladas en diferentes tipos de suelos.

Figura 13

Curvas de espectros de densidad espectral según Peterson (1993)



Nota: adaptado de Peterson (1993).

2.2 Marco conceptual

- **Placas tectónicas.** Son los distintos fragmentos de la capa superficial sólida de la tierra (litosfera) que se mueve sobre una capa viscosa (astenosfera). El movimiento genera interacción entre las placas produciendo la formación de montañas, terremotos y volcanes, además de la distribución de continentes y océanos (Kearey et al., 2009). En la actualidad, se conocen las siguientes principales placas tectónicas: placa del Pacífico, placa de América del Norte, placa de América del Sur, placa Euroasiática, placa Africana, placa Indoaustraliana, placa Antártica y placa de Nazca (Tarbuk et al., 2018).

En la figura 14, se muestra las 08 principales placas tectónicas, así como las placas secundarias como la placa de Cocos, placa del Caribe, placa de Scotia y placas filipinas.

Figura 14

Placas tectónicas principales y secundarias en el mundo.



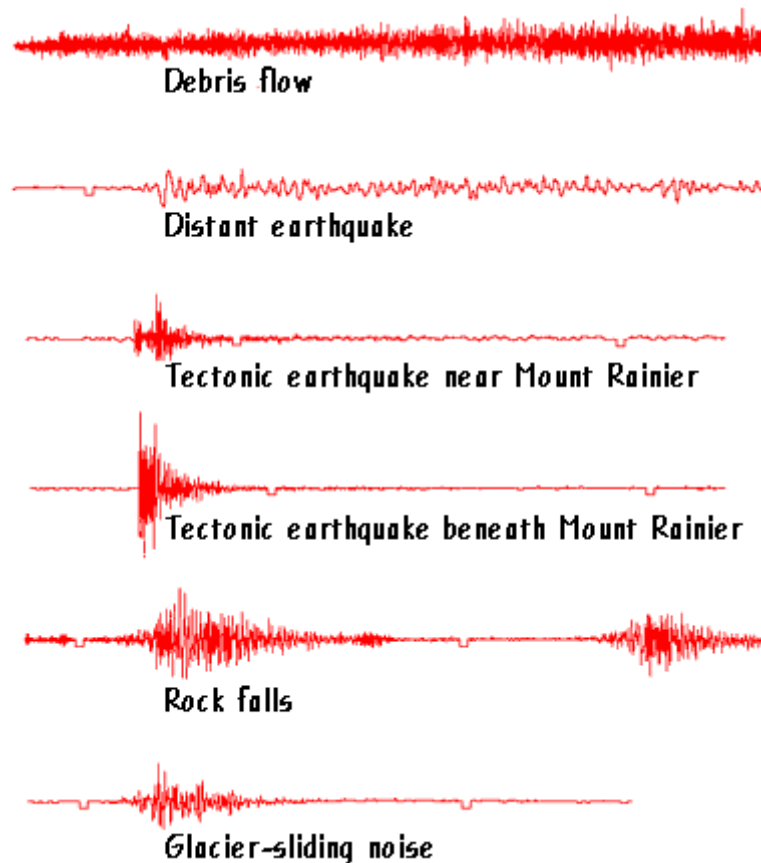
Nota: tomado de El País Honduras (2025).

- **Sismo.** Es el proceso de generación y liberación repentina de energía en la corteza terrestre que posteriormente se propaga en forma de ondas por el interior de las capas de la tierra. Cuando llegan a la superficie, generan sacudimiento del suelo, que es percibido por la población (IGP, 2025). El origen de un sismo es principalmente por el movimiento repentino de las placas tectónicas. Las cuales se mueven lentamente, sin embargo se atascan en sus bordes debido a la fricción. Al superar esta fricción se produce un sismo. La actividad volcánica y las explosiones artificiales producidas por el hombre son también fuentes de origen de un sismo (USGS, 2022).
- **Señales sísmicas.** Son ondas momentáneas generadas por fuente sísmica natural como ruptura de corteza o deslizamiento de fallas o fuente sísmica artificial como explosivos. Estas señales permiten ubicar las fuentes y estudiar la estructura de medio de propagación (Medina, 2016). Las señales sísmicas son los patrones característicos de los diferentes tipos de movimientos captados por un sismómetro, que pueden ser terremotos, erupciones volcánicas, avalanchas o actividades humanas. La señal de cada evento produce una forma de onda única que suelen distinguirse por su amplitud, frecuencia y duración de la onda (USGS, 2025).

En la figura 15, se muestra las señales sísmicas producidas por eventos como el ruido del ambiente, sismo lejano, sismo tectónico cerca y alejado del sismómetro, caída de rocas y ruido de deslizamiento glaciar.

Figura 15

Señales sísmicas producida por eventos diferentes.



Nota: tomado de USGS (2025)

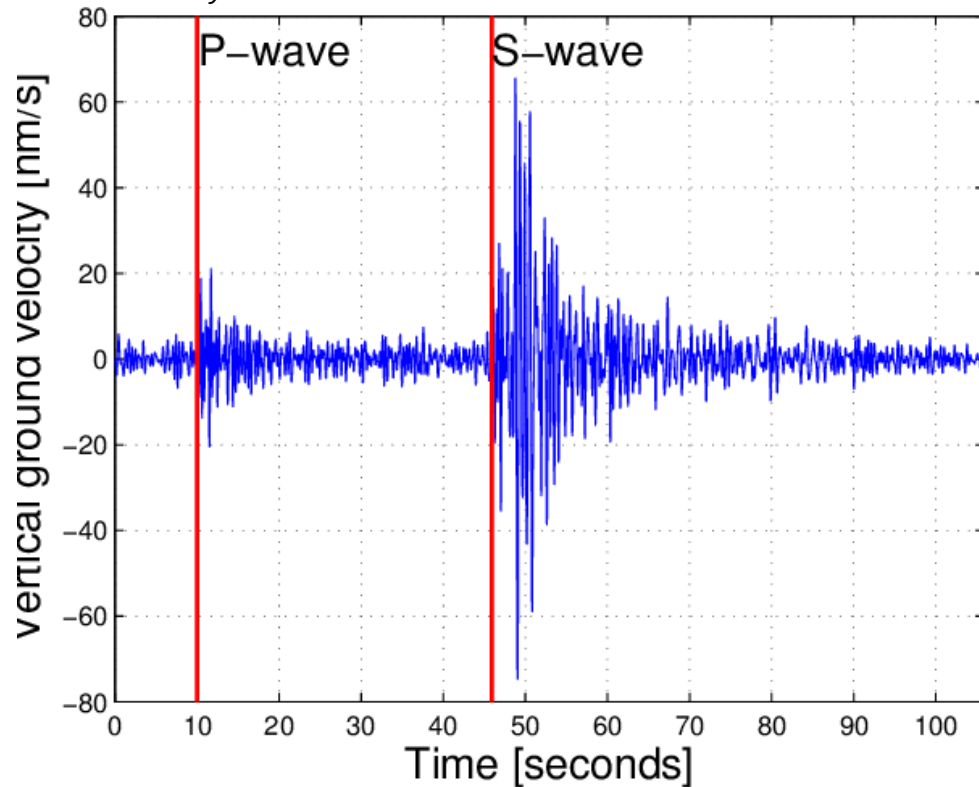
- **Ondas sísmicas tipo P.** También llamadas ondas primarias, son ondas de tipo longitudinal; es decir, se propagan en un medio que es comprimido y dilatado en dirección de la propagación. Estas ondas son las primeras en ser detectadas por los sensores sísmicos debido a su alta velocidad en relación a los demás tipos de ondas sísmicas y pueden hacerlo a través de cualquier tipo de material (IGP, 2025).
- **Ondas sísmicas tipo S.** También llamadas ondas secundarias, son ondas de tipo transversales; es decir, se propagan en un medio que es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación. Las ondas S viajan únicamente a través de sólidos, siendo su velocidad alrededor del 60% la de una onda P para cualquier material sólido. La onda S tiene mayor amplitud que

la P y es por ello que, durante la ocurrencia de un sismo, causa mayor daño (IGP, 2025).

En la figura 16 se muestra la señal sísmica de un terremoto registrado en Mongolia y observado a 307 km de distancia, en esta señal se puede observar la llegada de la onda p y s.

Figura 16

Registro de la onda P y S en una señal sísmica



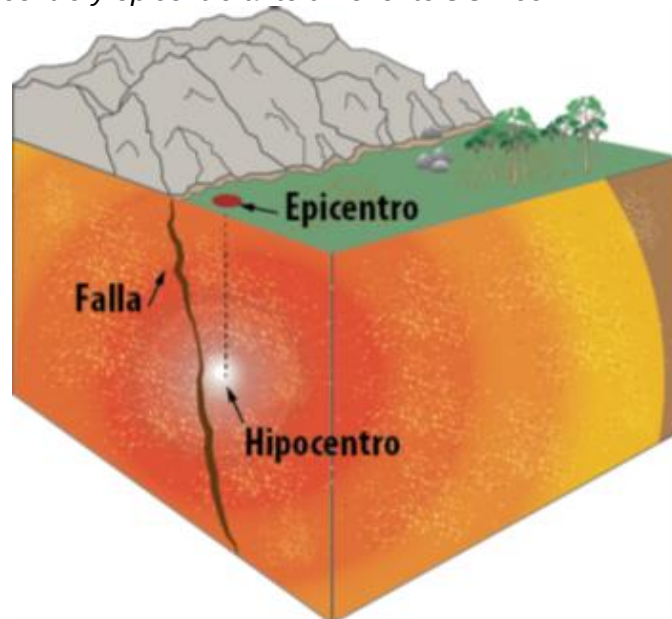
Nota: tomado de Bui et al. (2015).

- **Hipocentro y epicentro de un sismo.** Es el punto interior de la corteza terrestre donde se origina un terremoto, este punto se encuentra generalmente a kilómetros de profundidad desde la superficie terrestre (Zafra, 2018). Por otro lado el epicentro se define como la proyección en la superficie terrestre del hipocentro, donde por lo general se percibe con mayor intensidad el movimiento sísmico (IGP, 2025).

La figura 17 muestra la ubicación del hipocentro y epicentro ante la presencia de un sismo.

Figura 17

Ubicación del hipocentro y epicentro ante un evento sísmico.



Nota: tomado de RSPR (2025)

- **Intensidad y magnitud de un sismo.** Es el impacto que genera un sismo sobre el entorno de un lugar en específico. Se determina por factores como la cercanía al epicentro, características geológicas del área, el tipo de suelo y la calidad de construcciones existentes. Por otro lado, la magnitud es una medida de la cantidad de energía liberada en el foco sísmico. Se obtiene tomando en cuenta la amplitud de la onda sísmica y se expresa en escala de Richter o como magnitud de momento M_w (Centro Sismológico Nacional , 2025).
- **Ruido sísmico.** Es la vibración continua y persistente en la superficie, la cual no corresponde a señales generadas por un evento sísmico. Este ruido es generado por diversas fuentes naturales (olas oceánicas, vientos, movimientos fluviales) y artificiales (tráfico, maquinaria, construcción), generalmente se considera una interferencia en los registros sísmicos, sin embargo, se emplea para análisis de estructura del subsuelo (Kumar & Ahmed, 2021). En su mayoría los registros obtenidos muestran algún tipo de ruido, en muchos casos este es causado por agentes de tipo armónico, cuyos rangos de frecuencia oscilan entre 0.1 a 1 Hz. Cuando se filtra una señal de este tipo, se llega a notar que el ruido

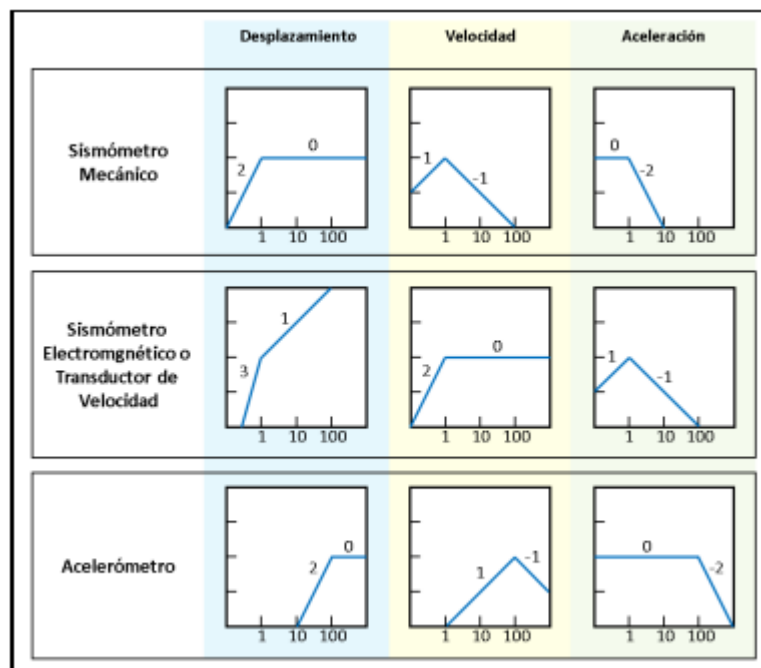
a veces oculta una señal originada por un evento sísmico, haciendo difícil el tratamiento de esta señal (Havskov y Alguacil, 2002).

- **Respuesta frecuencial.** Es la respuesta que tienen los sensores sísmicos en velocidad o aceleración dentro de una determinada banda frecuencial (Medina, 2016). Según Havskov y Alguacil (2002), la respuesta en frecuencia de un sismómetro indica como el instrumento responde a los distintos rangos de frecuencia del movimiento del suelo, siendo esta respuesta representada mediante una función matemática la cual refleja los cambios en la amplitud y la fase.

La figura 18 muestra la respuesta de frecuencia de un sensor mecánico de 1Hz, sensor electromagnético de 1Hz y un acelerómetro de 100Hz.

Figura 18

Respuesta en frecuencia de sismómetro y acelerómetro



Nota: tomado de Havskov y Alguacil (2002)

- **Sensibilidad.** Se define como la capacidad de un sensor para detectar pequeños movimientos generados por eventos sísmicos. Los sismómetros son los que tienen mayor sensibilidad y pueden captar señales pequeñas y débiles

a diferencia de los acelerómetros que captan señales con amplitudes muy altas (Mamani, 2021).

- **Rango dinámico.** Se denomina rango dinámico a la razón entre la señal más grande y la más pequeña que el sensor puede detectar y registrar sin distorsión, se expresa en decibelios (dB). Este parámetro permite asegurar que el sismómetro capte movimientos sísmicos muy leves, así como terremotos de gran magnitud (Medina, 2016).
- **Linealidad.** Se refiere a la relación directa y proporcional entre la señal de entrada y la señal de salida de un sismómetro. De manera ideal se requiere que un sensor se comporte como un sistema lineal, de tal manera que si al duplicar la señal de entrada, la salida también será igualmente duplicada (Medina, 2016).
- **Sistema global de navegación por satélite (GNSS).** Es el conjunto de sistemas que proporcionan las coordenadas geográficas de un punto en la superficie terrestre (latitud, longitud y altura) con un alto nivel de precisión. El sistema se basa en el principio de triangulación satelital, el cual es medir el tiempo de recorrido de una onda electromagnética entre un satélite y el receptor. Conociendo la posición de un satélite, la fecha y hora exacta a la cual una señal fue emitida y recibida, entonces se puede deducir que el receptor se sitúa sobre una esfera centrada sobre el satélite de radio $C\Delta t$, donde c es la velocidad de propagación de la onda electromagnética y t es el tiempo de propagación de la onda entre el satélite y el receptor. Con la señal de 3 satélites se puede determinar la posición de un receptor (Villegas, 2020).
- **Latitud y longitud.** Son coordenadas geográficas que permiten identificar la posición de un punto sobre la superficie terrestre. La latitud indica la posición hacia el norte o sur respecto al Ecuador, utilizando grados que varían entre 0° y 90° , mientras que la longitud señala la ubicación hacia el este o el oeste desde el meridiano de Greenwich, con valores que oscilan entre 0° y 180° . Ambas medidas se expresan en grados, minutos y segundos, lo que permite establecer

coordenadas exactas en cualquier punto del planeta (Centro Sismológico Nacional , 2025).

- **Federación Internacional de redes de sismógrafos digitales (FDSN).** Es una organización mundial, cuyos grupos que lo conforman son responsables de la instalación y el mantenimiento de sismógrafos digitales, ya sea dentro de sus fronteras geográficas o a nivel mundial. Esta cooperación ayuda a los científicos de todo el mundo a promover el avance de las ciencias de la Tierra y, en particular, el estudio de la actividad sísmica global (FDSN, 2025).
- **Instituto Geofísico del Perú (IGP).** Es una entidad dedicada a la investigación y estudios en el campo de la geofísica. Proporciona información sobre alertas sísmicas y realiza estudios científicos que contribuyen al conocimiento y la mitigación de riesgos naturales en el Perú (IGP, 2025).
- **Formato SEED.** (Standard for the Exchange of Earthquake Data) Es un formato estándar internacional para el intercambio de datos sismológicos digitales. Fue diseñado con el objetivo de ser utilizado por los sismólogos, para el intercambio entre instituciones de datos de movimientos de tierra sin procesar (*Incorporated Research Institutions for Seismology*, 2012).
- **Formato Rinex.** *Receiver Independent Exchange Format* es un formato estándar utilizado para el almacenamiento y el intercambio de datos de los satélites que conforman el sistema global de navegación por satélite (GNSS). Este formato permite la compatibilidad entre diferentes marcas de receptores y software de procesamiento, facilitando el archivo y la distribución de datos GNSS de manera eficiente y sin ambigüedad (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2024).
- **Señal analógica.** Es una señal que varía de manera continua en el tiempo y puede tomar cualquier valor dentro de un rango determinado. Estas señales se utilizan para representar información mediante variaciones en amplitud y frecuencia. Las señales analógicas son utilizadas para la transmisión de audio,

video, y en sistemas de comunicación (Miyara, 2004). Las señales analógicas representan fenómenos físicos mediante variaciones continuas en el tiempo y la amplitud, lo que permite registrar con fidelidad eventos naturales como los movimientos sísmicos (González & Blanco, 2013).

- **Señal digital.** Es una secuencia de valores discretos que representan información. Estas señales se basan en la lógica binaria, utilizando unos y ceros para codificar datos. A diferencia de las señales analógicas, las señales digitales no varían de manera continua, sino que saltan entre valores específicos (Miyara, 2004). Una señal digital está compuesta por muestras tomadas a intervalos regulares de la señal analógica original, lo que permite procesarla y almacenarla digitalmente como en computadoras, celulares o sismógrafos modernos (García & Romero, 2015).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Introducción al desarrollo del trabajo de investigación

En el presente trabajo de investigación se describe el desarrollo e implementación de una red geofísica de manera temporal en el periodo comprendido entre noviembre del 2021 y diciembre del 2024 en los departamentos de Lima, Ica, Ayacucho, Huancavelica, Arequipa, Moquegua y Tacna.

La implementación de la red geofísica surge por la necesidad de contar con una red propia la cual permita obtener datos sísmicos que ayuden a entender a especialistas en el campo de ciencia de la tierra la preparación de terremotos en la zona de subducción.

La red geofísica está conformada por 08 estaciones geodésicas y 24 estaciones sísmicas las cuales están distribuidas de manera estratégica en los departamentos anteriormente mencionados teniendo en cuenta la seguridad de los equipos y el acceso a las estaciones.

En las estaciones sísmicas se utilizan 11 sensores de velocidad de banda media (20s – 100Hz) y 13 sensores de velocidad de banda ancha (120s – 150Hz) de la marca Nanometrics. Además, se utilizan 24 digitalizadores modelo centaur3 de la marca Nanometrics. Las estaciones geodésicas están conformadas por una antena con sistema global de navegación por satélite (GNSS) de la marca Tallysman y un registrador de la marca Septentrio.

Toda red geofísica implementada aprovecha la energía solar a través de paneles solares el cual mediante un controlador de carga de la marca Victron energy garantizan que toda la energía solar se convierta en utilizable para los equipos y almacenada en una batería.

3.2 Instalación de estaciones de monitoreo geofísico en las regiones del sur del Perú

3.2.1 Ubicación y nomenclatura de las estaciones geofísicas

El área objetivo de estudio donde se implementa la red geofísica es el sur del Perú (13°S-18°S) el cual comprende los departamentos de Lima, Ica, Ayacucho, Huancavelica, Arequipa, Moquegua y Tacna. La red geofísica está conformada por 08 estaciones geodésicas y 24 estaciones sísmicas las cuales están distribuidas en lugares estratégicos teniendo en consideración los siguientes criterios:

- La distancia mínima entre cada estación geofísica es de 30km lineales, considerando las estaciones geofísicas existentes del Instituto Geofísico del Perú.
- Las estaciones geofísicas están ubicadas en un lugar de fácil acceso considerando la seguridad de los instrumentos sísmico.
- Las estaciones geodésicas se ubican en zonas rocosas o bases de concreto fijas, además de tener un horizonte libre de obstrucciones.
- Las estaciones sísmicas se ubican alejadas de las fuentes de ruido ambiental.

Algunas estaciones sísmicas y estaciones geodésicas están instaladas en el mismo lugar debido a que cumplen los criterios antes mencionados, así mismo para la instalación de la red geofísica se ha coordinado con el Instituto Geofísico del Perú (IGP), Servicio Nacional de Áreas Protegidas por el Estado (Sernamp), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) y autoridades provinciales y distritales la instalación dentro de áreas de su jurisdicción.

En la figura 19 se muestra la ubicación de las 08 estaciones geodésicas con etiquetas de color azul distribuidas en los departamentos de Lima, Ica, Huancavelica, Ayacucho y Arequipa.

Figura 19

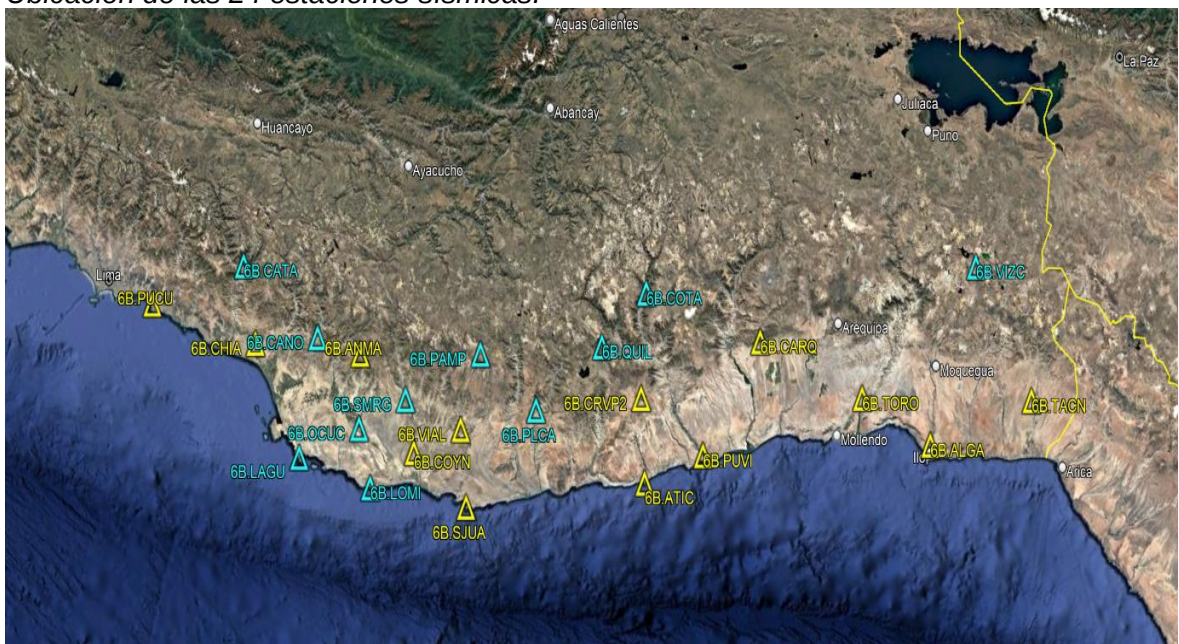
Ubicación de las 08 estaciones geodésicas.



En la figura 20 se muestra la ubicación 11 estaciones sísmicas de banda media etiquetadas de color amarillo y 13 estaciones sísmicas de banda ancha etiquetadas de color celeste, distribuidas en los departamentos de Lima, Ica, Huancavelica, Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna.

Figura 20

Ubicación de las 24 estaciones sísmicas.



El nombre de la estación geodésica y estación sísmica se eligen de manera libre, pero se tiene que respetar un máximo de 5 caracteres. Según la Federación Internacional de Redes de Sismógrafos Digitales (FDSN) las estaciones sísmicas siguen un estándar en la nomenclatura:

Network.StationName.LocationCode.ChannelCode

- *Network*. Es el código de la red que consta de dos números o letras, que es brindado por la FDSN. Para la red sísmica instalada para este proyecto es 6B.
- *Station Name*. Es el nombre de la estación.
- *Location Code*. Es un código alfanumérico de dos caracteres que representa la ubicación de la serie temporal de digitalizador centaur3. Para este proyecto es 00.
- *Channel Code*. Es un código con tres caracteres, el primero representa la ganancia del sensor, el segundo es por el tipo de frecuencia de corte del sensor y el tercero es por la orientación (vertical, norte-sur, este-oeste). Para el proyecto se utiliza tres códigos debido a la característica triaxial de los sensores HHZ, HHN, HHE.

La nomenclatura para la red sísmica de este proyecto queda definido de la siguiente 6B.xxxx.00.HH* donde xxxx representa al nombre de la estación de la estación y * representa la orientación de cada canal del sismómetro triaxial (Z,N,E).

En la tabla 2 se muestra la nomenclatura de las 24 estaciones sísmicas y sus respectivas coordenadas.

Tabla 2*Coordenadas de las estaciones sísmicas*

Código de estación	Latitud	Longitud	Altitud
6B.ALGA	-17.623802	-71.271927	131
6B.ANMA	-13.936260	-75.353437	2266
6B.ATIC	-16.231331	-73.697196	62
6B.CANO	-13.604209	-75.613269	1119
6B.CARQ	-16.098493	-72.199007	2219
6B.CATA	-12.790846	-75.884051	1444
6B.CHIA	-13.275680	-76.127249	404
6B.COTA	-15.202156	-72.887481	2684
6B.COYN	-14.769596	-75.359492	275
6B.CRVP2	-15.746611	-73.365838	1957
6B.LAGU	-14.145540	-76.273564	93
6B.LOMI	-14.714969	-75.850802	35
6B.OCUC	-14.330029	-75.681878	517
6B.PAMP	-14.612249	-74.423392	4065
6B.PLCA	-15.224807	-74.229892	1085
6B.PUCU	-12.460795	-76.770809	420
6B.PUVI	-16.404966	-73.123563	98
6B.QUIL	-15.247634	-73.454446	3429
6B.SJUA	-15.361456	-75.187506	47
6B.SMRG	-14.436573	-75.196349	500
6B.TACN	-17.948073	-70.259060	986
6B.TORO	-16.979056	-71.625084	354
6B.VIAL	-14.909425	-74.897199	696
6B.VIZC	-16.404966	-73.123563	4662

En la tabla 3 se muestra la nomenclatura de las 08 estaciones geodésicas con sus respectivas coordenadas.

Tabla 3*Coordenadas de las estaciones geodésicas*

Código de estación	Latitud	Longitud	Altitud
ANMA	-13.936260	-75.353437	2226
CAZL	-13.020070	-76.473392	37
CHIA	-13.275680	-76.127249	404
COYN	-14.769596	-75.359482	275
CRVP	-15.762891	-73.372299	1892
OCUC	-14.330029	-75.681878	517
PARA	-13.828247	-76.331411	240
PLCA	-14.224807	-74.229892	1085

Anteriormente se ha mencionado que una estación geodésica y sísmica pueden ser ubicadas en el mismo lugar, teniendo en cuenta los criterios anteriormente mencionados, en este proyecto se tiene 5 estaciones en el mismo lugar, las cuales son ANMA, CHIA, COYN, OCUC y PLCA.

3.2.2 Infraestructura de la red geofísica

La red geofísica se ha instalado de manera temporal para registrar datos en el periodo comprendido entre noviembre 2021 y diciembre 2024, es por ello que el diseño de la infraestructura se ha realizado teniendo en cuenta que al finalizar este proyecto el material utilizado como infraestructura pueda servir a futuros proyectos.

La infraestructura para este proyecto es un gabinete metálico con las siguientes dimensiones 50x50x30 cm, este gabinete se utiliza como protección de los registradores sísmicos y/o geodésicos, así como de los componentes del sistema de energía. Sobre la tapa del gabinete se fija el panel utilizando dos perfiles de aluminio de 67 cm, ambos separados 39.5cm. El gabinete se asienta sobre una base de cemento que permite ser fijado con al suelo, para mayor seguridad se acondiciona un sistema de cierre con candado. como se muestra en la figura 21.

Figura 21

Infraestructura de la red geofísica.



En la figura 22 se muestra el resultado de la instalación de la infraestructura que protege los instrumentos sísmicos y geodésicos, además de los componentes de energía de la estación geofísica PARA.

Figura 22

Instalación de la estación geofísica PARA.



3.2.3 Sistema de energía de la red geofísica

El sistema de energía que utiliza la red geofísica es la energía solar fotovoltaica, la cual mediante un panel solar convierte la radiación solar en electricidad y con un controlador de carga se evita la sobrecarga y descarga de las baterías donde se almacena la energía eléctrica producida.

La elección del panel solar, controlador de carga y baterías, depende de los equipos que utilizan la energía eléctrica producida por el sistema solar fotovoltaico. En la tabla 4 se muestra el consumo por hora y diario de los equipos que conforman la instrumentación sísmica.

Tabla 4

Consumo de potencia de la instrumentación sísmica

Equipos	Cantidad	Potencia(w)	Horas	Consumo día (wh/día)
Digitalizador Centaur3	1	1.0	24	24
Registrador Septentrio	1	1.5	24	36
Antena VP6000	1	0.5	24	12
Sensor TC20PH	1	0.2	24	4.8
Sensor T120QA	1	0.5	24	12

El sistema fotovoltaico trabaja a 12V por ello, consideramos el caso donde se instala una estación sísmica y geodésica en el mismo lugar, siendo la potencia de consumo al día de 88.8Wh/día, para garantizar la autonomía del sistema eléctrico, aumentamos un 30% el consumo diario, resultando:

$$\text{Consumo diario} = 115.44 \text{ Wh/día}$$

El panel solar que se ha elegido es de la marca Era solar de 100W/12V, al contar con equipos de bajo consumo el tipo de celda del panel es policristalino, a continuación, se muestra lo parámetros principales del panel:

- Potencia máxima : 100W
- Voltaje en circuito abierto (V_{OC}) : 22.7V
- Intensidad en cortocircuito (I_{OC}) : 5.79A
- Voltaje a máxima potencia (V_m) : 18.30V
- Intensidad a máxima potencia (I_m): 5.46A

Para calcular la cantidad de panel solar que se usa en este sistema se usa la siguiente ecuación 3:

$$\text{Cantidad de panel solar} = \frac{\text{Consumo diario} \left(\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right)}{\text{Hora mínima de sol} \times \text{Potencia máxima}} \quad (3)$$

Consideramos como hora mínima de sol en los lugares donde se instalan las estaciones de 12:00 a 15:00 resultando 4h:

$$\text{Cantidad de panel solar} = \frac{115.44 \text{ Wh/día}}{4h \times 100W}$$

$$\text{Cantidad de panel solar} = 0.2886$$

El resultado obtenido nos indica que para nuestro sistema es necesario un panel solar de 100W/12V.

El controlador de carga se elige considerando que su tensión máxima en cortocircuito sea mayor a la tensión en circuito abierto del panel solar y calculando la corriente de carga nominal del controlado utilizando la ecuación 4.

$$I_n = \frac{\text{Potencia máxima del panel}}{\text{Voltaje del sistema}} \quad (4)$$

$$I_n = \frac{100W}{12V}$$

$$I_n = 8.33 A$$

Para nuestro sistema elegimos un controlador de carga de la marca Victron energy como se muestra en la figura 23, el cual utiliza la tecnología MPPT, que permite aprovechar la máxima potencia del panel. Con el valor de corriente nominal obtenido con la ecuación 4 seleccionamos el controlador con corriente nominal de 15A y tensión máxima de circuito de 75v. A continuación, se muestra los parámetros principales del controlador de carga.

- Tensión de la batería : 12/24V
- Corriente de carga nominal (I_n) : 15A
- Potencia nominal a 12/24V (P_n) : 220/440W
- Tensión máxima de circuito abierto (V_{oc}) : 75V

Figura 23

Controlador de carga MPPT 75/15.



La batería que se elige es de tipo AGM de libre mantenimiento de 12V/100Ah y la cantidad de baterías se calcula mediante la siguiente ecuación 5:

$$C_{Ah} = \frac{\text{Consumo diario } \left(\frac{Wh}{\text{día}} \right) * d}{P_d * V} \quad (5)$$

Donde

- P_d : Profundidad de descarga de la batería
- V : Tensión del sistema

- d : Días de autonomía de la instalación

La profundidad de descarga de la batería se obtiene de la ficha técnica y para este tipo de batería es de 0.5, la tensión del sistema es de 12V y se requiere 4 días de autonomía, obteniendo:

$$C_{Ah} = \frac{115.44 * 4}{0.5 * 12}$$

$$C_{Ah} = 76.96Ah$$

El resultado obtenido nos indica que para nuestro sistema es necesario una batería de 12V/100Ah.

En la tabla 5 se muestra los valores de voltajes de las batería durante el día 30/07/2022 de las estaciones 6B.CANO, 6B.COYN y COYN.

Tabla 5

Voltaje de baterías de las estaciones 6B.CANO, 6B.COYN y COYN.

Hora	Voltaje (6B.CANO)	Voltaje (6B.COYN y COYN)
00:00	12.87	12.88
01:00	12.86	12.87
02:00	12.84	12.84
03:00	12.82	12.82
04:00	12.80	12.79
05:00	12.78	12.77
06:00	12.75	12.75
07:00	12.74	12.74
08:00	12.82	12.75
09:00	13.74	13.30
10:00	13.62	14.04
11:00	13.61	13.77
12:00	13.62	13.72
13:00	13.58	13.69
14:00	13.58	13.65
15:00	13.56	13.65
16:00	13.56	13.67
17:00	13.58	13.33
18:00	12.95	13.03
19:00	12.94	12.98
20:00	12.92	12.95
21:00	12.91	12.94
22:00	12.90	12.91
23:00	12.89	12.90

3.2.4 Instalación de estaciones geodésicas

Las estaciones geodésicas están conformadas por una antena GNSS, receptor GNSS, cable coaxial con terminales hembra TNC, cable de poder y cable de red. En la figura 24 y figura 25 se muestra la antena GNSS y receptor GNSS utilizados en este proyecto.

Figura 24

Antena GNSS modelo VeraPhase de la marca Tallysman



Figura 25

Receptor GNSS modelo AsteRx SB ProConnect de la marca Septentrio



La antena GNSS que se ha seleccionado es de la marca Tallysman y del modelo VeraPhase 6000. Esta antena cubre toda la constelación de GNSS (1164 -1300MHz y 1559 – 1610 MHz) incluido los servicios de corrección de banda L (1525 – 1559 MHz). A continuación, se muestra los parámetros importantes y para mayor detalle se encuentra en el anexo 1.

- Ganancia de antena : 5 dB – 7dB
- Eficiencia : >70%
- Relación axial : <0.5 dB en el Azimut

La antena GNSS va instalado sobre un ping geodésico de 0.175 m de altura, que va incrustado sobre una roca. La antena GNSS se instala con dirección al norte como punto de referencia y se ajusta al ping geodésico con prisioneros como se muestra en la figura 26.

Figura 26

Instalación de antena GNSS de la estación geodésica ANMA.

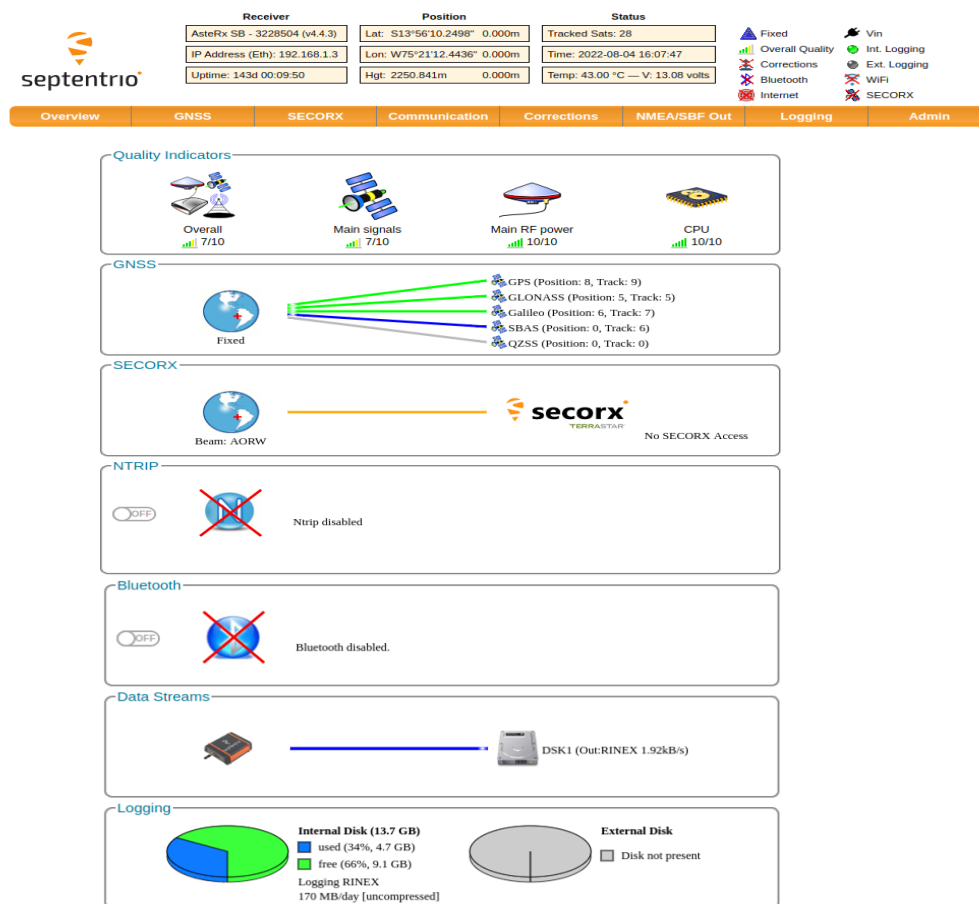


El receptor GNSS que se ha seleccionado es de la marca Septentrio modelo AsteRx SB ProConnect, en el receptor se almacenan los datos captados por la antena GNSS. Para este proyecto se ha configurado el registro de datos para dos frecuencias en el formato rinex. La primera frecuencia de 30s cada 24 horas y la segunda frecuencia de 1s cada 1h.

Además, en el receptor se configura el nombre de la estación, datos de la antena GNSS y la interfaz web la cual nos permite ingresar a la interfaz gráfica del equipo para visualizar el correcto funcionamiento de la estación sísmica, como se muestra en la figura 27. En la interfaz gráfica del registrador GNSS se encuentran las coordenadas geográficas del punto geodésico así como el número de satélites captados por la antena GNSS de las constelaciones GPS, glonas, galileo, sbas y qzss. Además nos proporciona la capacidad de memoria interna que tiene el equipo, el cual es de 16GB, otros parámetros con el voltaje, temperatura y el tiempo de encendido que tiene el equipo también se observa en la interfaz web.

Figura 27

Interfaz gráfica del receptor Septentrio de la estación geodésica ANMA.



En el anexo 2 se encuentra la ficha técnica del receptor Septentrio modelo AsteRx SB ProConnet.

3.2.5 Instalación de estaciones sísmicas

En este proyecto se ha instalado dos tipos de sensores, 11 sensores de banda media (20s – 100Hz) mostrados en la figura 28 y 13 sensores de banda ancha (120s – 150Hz) mostrados en la figura 29, ambos tipos de sensores son de la marca Nanometric de modelo Trillium compact 20s (TC20PH) y Trillium 120 (T120QA) respectivamente.

Figura 28

Sensor de banda media Trillium compact 20s



Figura 29

Sensor de banda ancha Trillium 120



En la tabla 6 se muestran las principales especificaciones técnicas de ambos sensores, en el anexo 3 y 4 se presenta las fichas técnicas de ambos sensores.

Tabla 6

Comparación entre el sensor TC20PH y T120QA

Especificaciones Técnicas	TC20PH	T120QA
Bandwidth	20s – 100Hz	120s – 150Hz
Sensitivity	750 v.s/m	1200 v.s/m
Clip Level	26 mm/s hasta 10Hz 0.17 g superior a 10Hz	16 mm/s hasta 10Hz 0.17 g superior a 10Hz
Topology	Sismómetro triaxial	Sismómetro triaxial
Mass Centering	No requiere	Centrado automático

De acuerdo a la tabla anterior, el sensor TC20PH es un sismómetro triaxial y su instalación se realiza enterrándolo a una distancia de 70cm y colocándolo en una loza de hormigón asegurando su verticalidad en un rango de 10°. El sensor debe estar orientado hacia el norte como punto de referencia. El sensor T120QA también es un sismómetro triaxial que requiere atención al momento de realizar la instalación, este sensor va enterrado a una distancia de 70 cm pero a diferencia del TC20PH tiene que ser protegido, para su protección se ha acondicionado un recipiente en la cual se ha realizado una base de hormigón para que el sensor repose. Este sensor también debe estar orientado hacia el norte y asegurar su verticalidad en un rango de 1.5°.

En la figura 30 se muestra la instalación del sensor T120QA de la estación 6B.CRVP2 y del sensor TC20PH de la estación 6B.CANO.

Figura 30

Instalación del sensor T120QA y del sensor TC20PH.



Además de los sensores, cada estación sísmica tiene un digitalizador de la marca Nanometric modelo Centaur3 como se muestra en la figura 31, este digitalizador es el encargado de realizar la conversión de señal eléctrica en señal digital a una frecuencia de 100Hz y posteriormente del almacenamiento de datos en una memoria interna de 8GB y memoria externa de 64GB.

Figura 31

Digitalizador centaur3



El digitalizador permite conectarse a su interfaz web como se muestra en la figura 32, donde se observa el estado general de la estación. Además, el digitalizador necesita una antena gps de donde obtiene las coordenadas y tiempo para el registro de dato. En la interfaz web se observa en tiempo real las señales que registra el sensor en sus tres canales (HHZ, HHN, HHE), además de parámetros como voltaje, capacidad de memoria interna y externa.

Figura 32

Estado general de la estación sísmica CANO.



3.3 Nivel de ruido sísmico de las estaciones según los modelos de Peterson

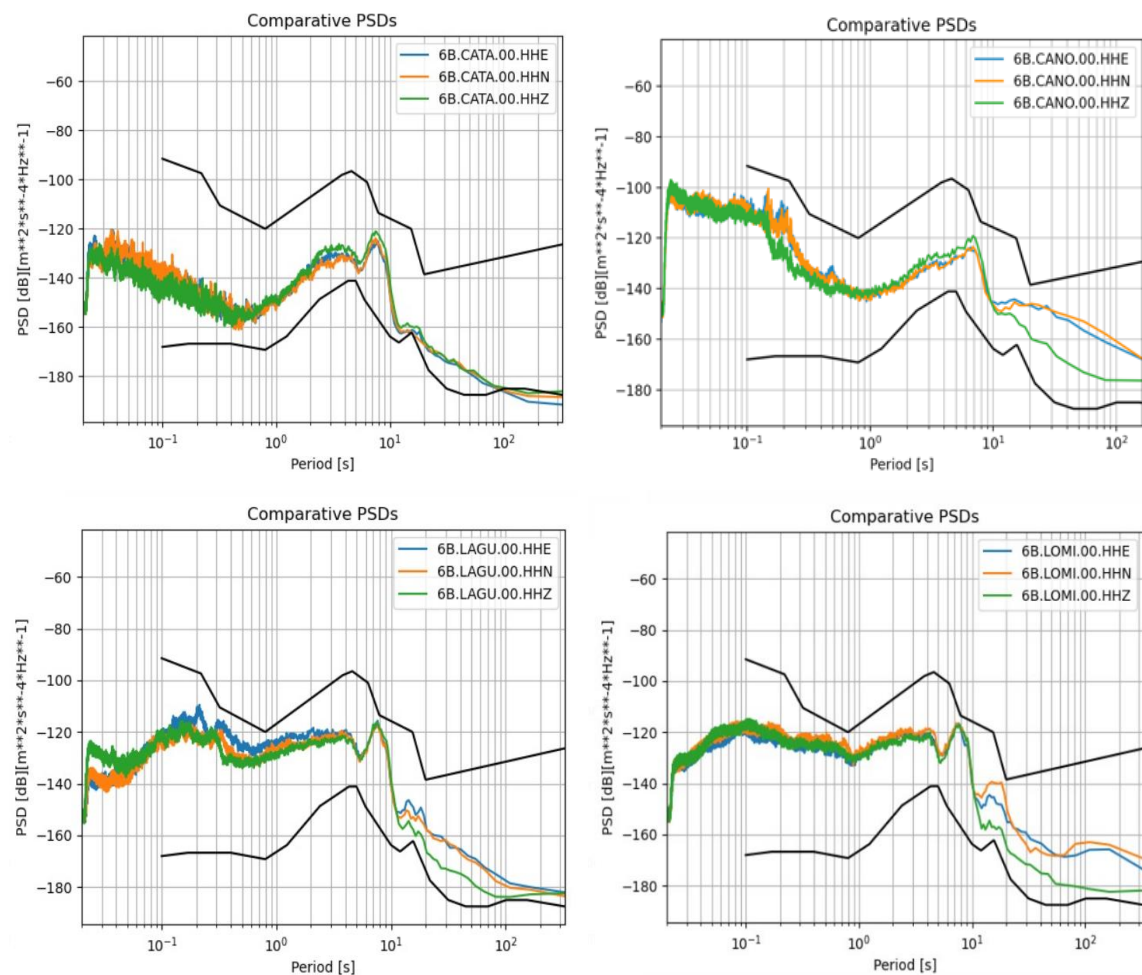
Al realizar la implementación de una estación sísmica se procura buscar ubicaciones alejadas de la población, de tal manera que el ruido ambiental sea mínimo y no afecte a la calidad de la señal, sin embargo, el elevado costo y la seguridad de la instrumentación sísmica hace sacrificar condiciones geológicas y geográficas ideales para buscar el equilibrio entre costos y beneficios.

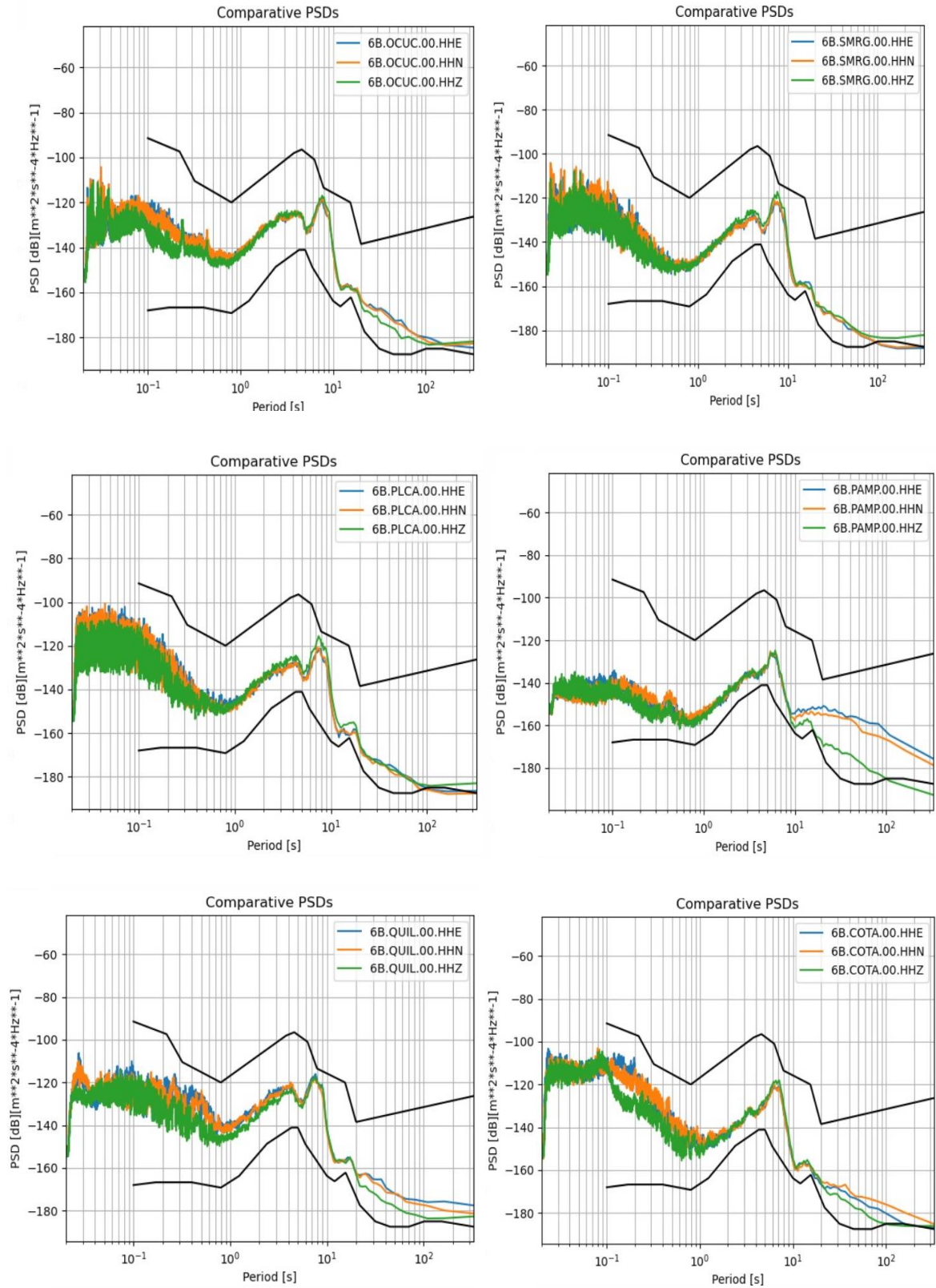
Este proyecto ha priorizado la seguridad de los equipos y así evitar su pérdida, por ello se ha realizado la instalación de las estaciones sísmicas en lugares donde se pueda tener vigilancia permanente. Por ellos, se utiliza los modelos de ruido NLNM y NHNM desarrollados por Peterson (1993) para analizar que el ruido presente en la señal sísmica se encuentre dentro de los niveles establecidos por Peterson.

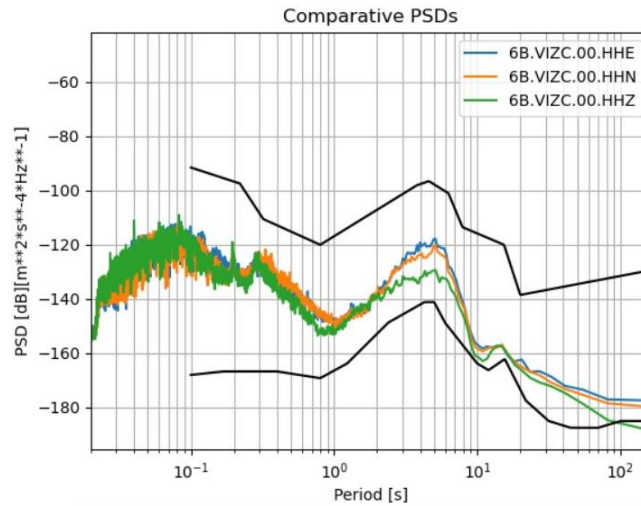
Al terminar la instalación de cada estación sísmica se realiza el análisis de ruido, para ello se utiliza un script desarrollado en Python, para este análisis es importante tener el registro de datos de al menos 1 hora en los tres canales del sensor, además de conocer la sensibilidad del sensor, siendo para el sensor TC20PH es de $750^V \cdot m/s$, en la figura 33 se muestra las gráficas del análisis de ruido de las estaciones implementadas con sensor de banda media: 6B.CATA, 6B.CANO, 6B.LAGU, 6B.LOMI, 6B.OCUC, 6B.SMRG, 6B.PLCA, 6B.PAMP, 6B.QUIL, 6B.COTA y 6B.VIZC.

Figura 33

Análisis de ruido de estaciones con sensores de banda media.





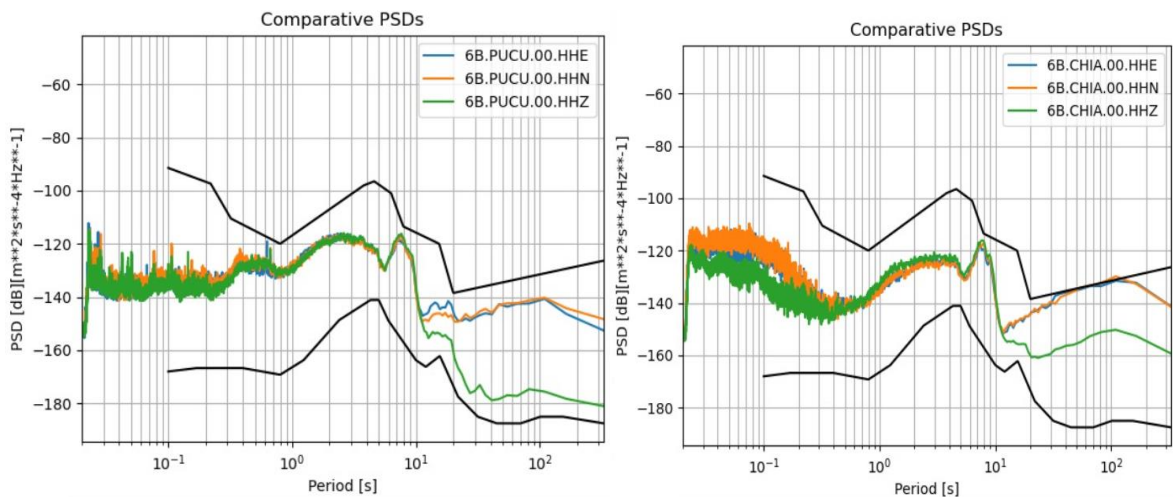


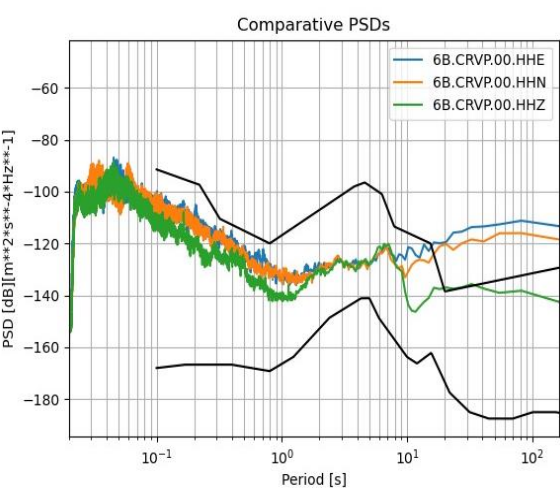
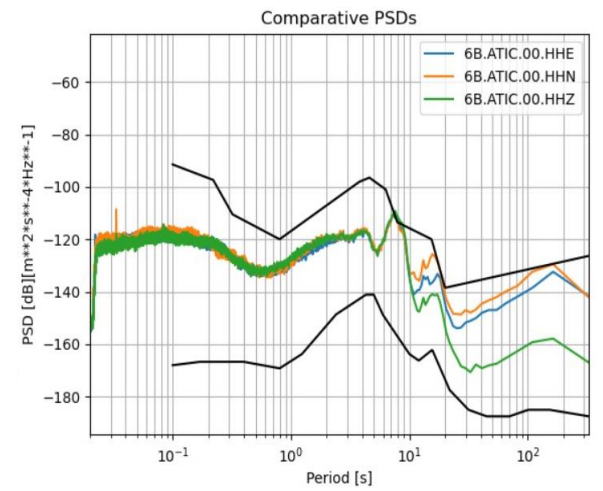
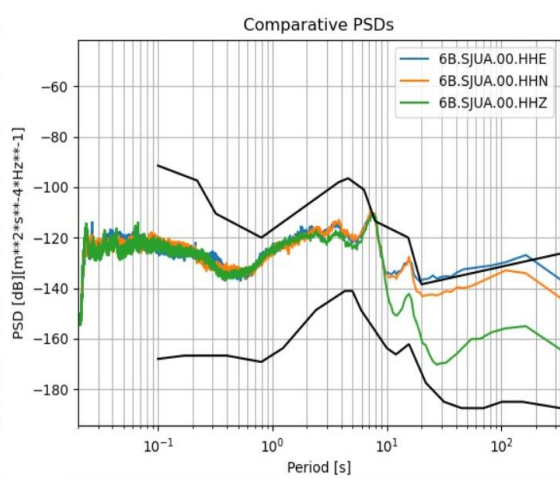
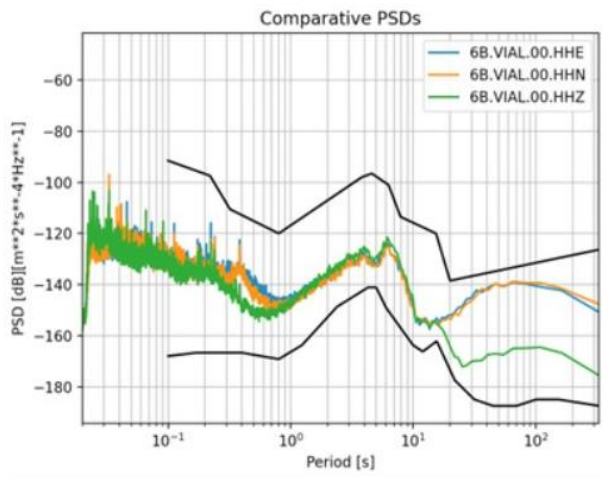
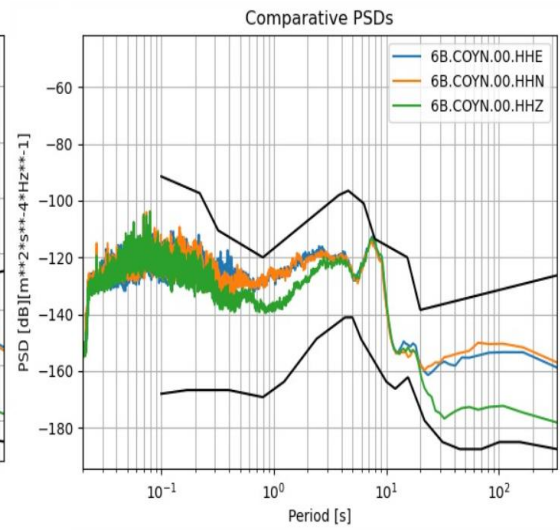
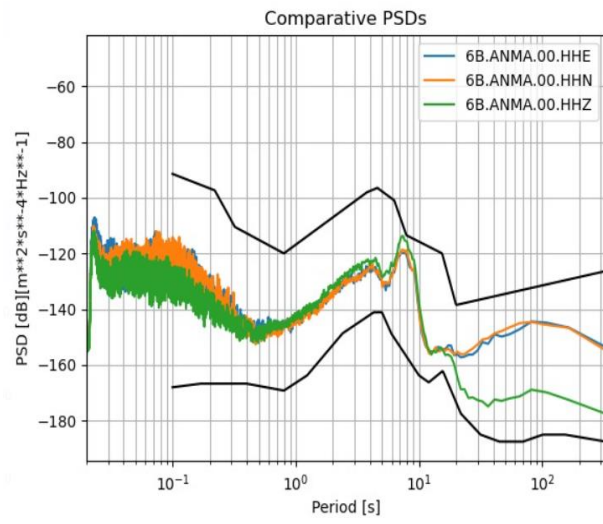
En las gráficas de la figura 33 se observa que las estaciones sísmicas implementadas con sensores de banda media (TC20PH) cumplen con los niveles de ruido según el modelo establecido por Peterson en sus tres canales (HHN, HHE, HHZ) dentro del rango de periodo 0.1 – 100s.

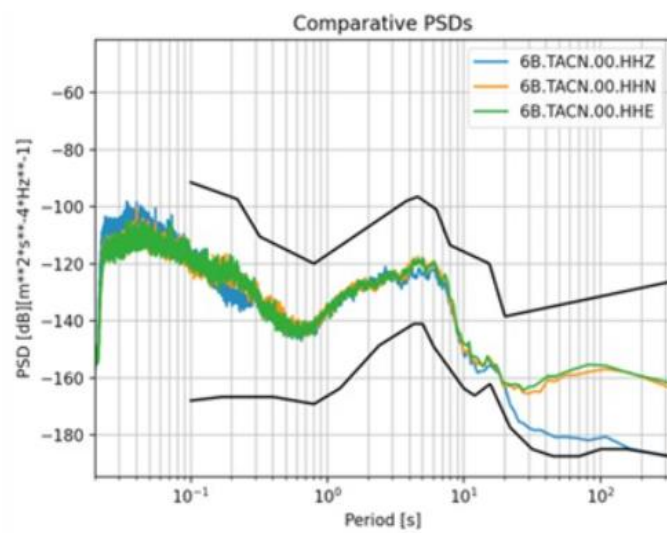
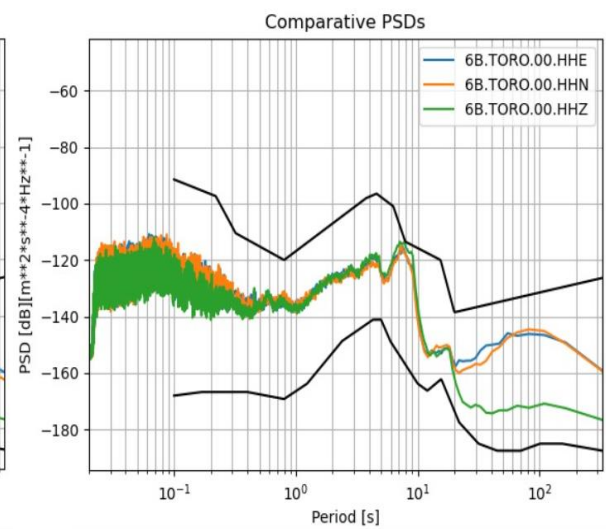
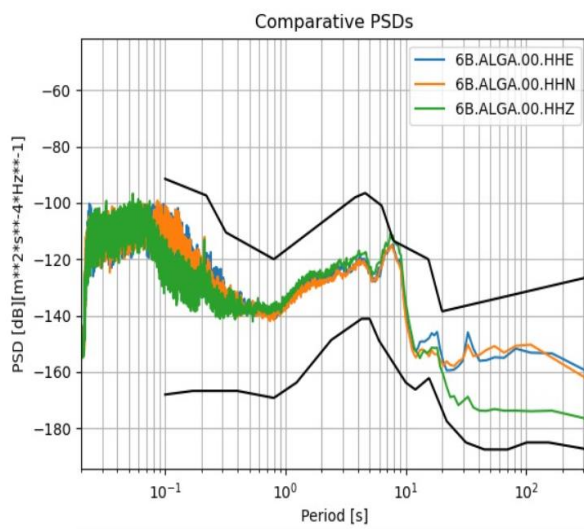
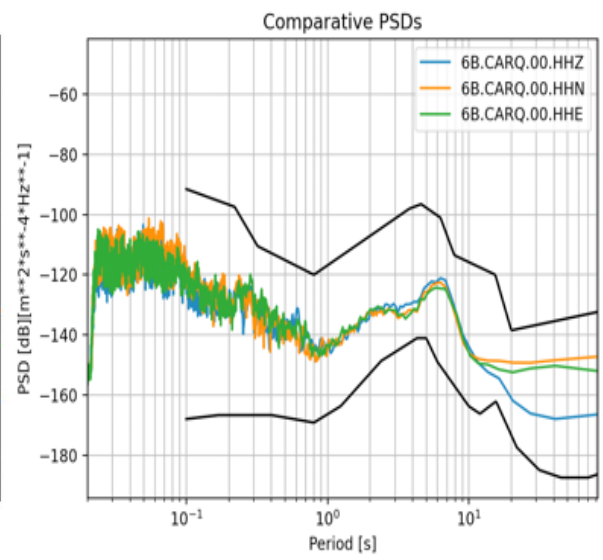
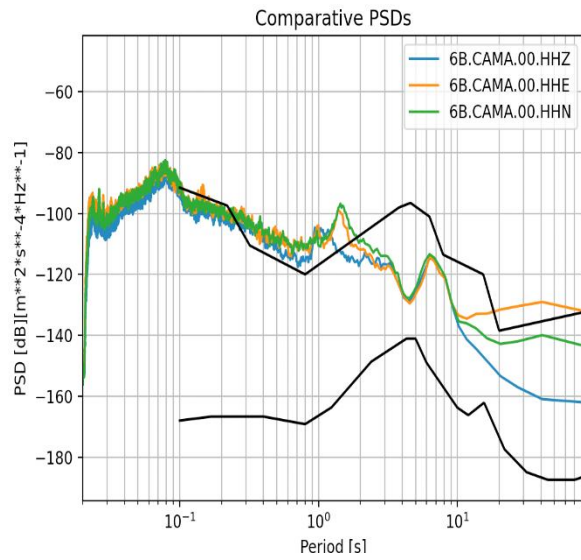
La sensibilidad para los sensores de banda ancha T120QA es de 1200 V.m/s , en la figura 34 se muestra las gráficas del análisis de ruido de las estaciones implementadas con sensor de banda ancha: 6B.PUCU, 6B.CHIA, 6B.ANMA, 6B.COYN, 6B.VIAL, 6B.SJUA, 6B.ATIC, 6B.CRVP, 6B.CAMA, 6B.CARQ, 6B.ALGA, 6B.TORO y 6B.TACN.

Figura 34

Análisis de ruido de estaciones con sensores de banda ancha.







En las gráficas de la figura 34 se observa que no todas las estaciones sísmicas implementadas con sensores de banda ancha (T120QA) cumplen con los niveles de ruido según el modelo establecido por Peterson en sus tres canales (HHN, HHE, HHZ) dentro del rango de periodo 0.1 – 100s. Estas estaciones son 6B.CRVP donde se observa que los canales HHE y HHN supera el nivel de ruido en el periodo de 10 – 100s y 6B.CAMA donde se observa los canales HHE, HHN y HHZ superan el nivel de ruido en el periodo de 0.1 – 1s, además se superar el nivel de ruido el canal HHE a partir del periodo 10 – 100s.

En el primer mantenimiento que se realizó a las estaciones sísmicas y geodésicas de este proyecto, se realizó la reubicación de las estaciones 6B.CRVP y 6B.CAMA, además de cambiar de su nomenclatura a 6B.CRVP2 y 6B.PUVI respectivamente.

3.4 Recolección de datos geofísicos

La red geofísica implementada, en el presente proyecto, corresponde a una red in situ. Esto significa que la recolección y almacenamiento de los datos se realiza directamente en el sitio de instalación de los instrumentos. Esta operación se lleva a cabo mediante visitas programadas cada tres meses. Esto permite realizar el mantenimiento, respaldo y descarga de la información registrada, que asegura así la continuidad de los datos y minimizando las pérdidas de información por fallos técnicos o condiciones externas.

A pesar de la planificación y el diseño adecuado de la red, durante el desarrollo del proyecto se presentaron pérdidas de datos en varias estaciones, tanto geodésicas como sísmicas. Estas interrupciones no estuvieron relacionadas con fallas en el diseño de la red o la configuración de los equipos, sino que fueron consecuencia de factores externos, principalmente, actos de vandalismo y robo. En algunos casos, los paneles solares que alimentaban las estaciones fueron sustraídos, lo que ocasionó cortes en el suministro eléctrico y, por ende, la interrupción del registro. En otras ocasiones, se registraron robos de componentes esenciales de la instrumentación sísmica, lo que comprometió totalmente la operatividad de las estaciones.

En la tabla 7, se detalla el período de disponibilidad de datos correspondientes a cada estación sísmica durante el intervalo comprendido entre marzo de 2022 y diciembre

de 2024. Asimismo, se indican claramente los periodos en los que las estaciones estuvieron inactivas o no registraron información, que permiten evaluar el desempeño general de la red y la magnitud de las interrupciones sufridas.

Tabla 7

Periodos de datos disponibles de las estaciones sísmica

Código de estación	Primer registro de datos	Último registro de datos	Periodo de datos perdidos
6B.ALGA	22/03/2022	08/12/2024	-
6B.ANMA	14/03/2022	28/11/2024	-
6B.ATIC	24/03/2022	03/12/2024	-
6B.CANO	13/03/2022	27/11/2024	19/02/2024 – 22/05/2024
6B.CARQ	17/03/2022	01/12/2024	-
6B.CATA	12/03/2022	27/11/2024	-
6B.CHIA	12/03/2022	14/12/2024	-
6B.COTA	16/03/2022	08/12/2022	08/12/2024 – 14/12/2024
6B.COYN	17/03/2022	28/11/2024	-
6B.CRVP2	08/08/2022	12/12/2024	-
6B.LAGU	13/03/2022	27/11/2024	02/09/2023 – 26/11/2023
6B.LOMI	16/03/2022	28/11/2024	-
6B.OCUC	13/03/2022	28/11/2024	-
6B.PAMP	25/03/2022	04/06/2023	04/06/2023 – 14/12/2024
6B.PLCA	22/03/2022	04/12/2024	-
6B.PUCU	11/03/2022	14/12/2024	-
6B.PUVI	14/04/2023	03/12/2024	-
6B.QUIL	15/03/2022	11/12/2024	22/09/2022 – 06/12/2022
6B.SJUA	24/03/2022	03/12/2024	-
6B.SMRG	15/03/2022	29/11/2024	-
6B.TACN	20/03/2022	10/12/2024	-
6B.TORO	19/03/2022	02/12/2024	-
6B.VIAL	18/03/2022	29/11/2024	-
6B.VIZC	20/03/2024	03/12/2024	-
6B.CAMA	23/03/2022	14/04/2023	-
6B.CRVP	16/03/2022	08/08/2022	-

El período de pérdida de datos, indicado en la tabla anterior, se atribuye, en su mayoría, al robo de paneles solares, lo que provocó la interrupción del suministro eléctrico y, por consiguiente, la suspensión temporal del registro de información sísmica. Sin embargo, en el caso específico de las estaciones 6B.COTA y 6B.PAMP, la pérdida de datos fue causada por un evento más crítico: el robo completo de la instrumentación sísmica, lo cual imposibilitó totalmente la operación de dichas estaciones durante el tiempo afectado.

La recolección de datos provenientes de las estaciones sísmicas se lleva a cabo a través del menú de mantenimiento disponible en la interfaz web del digitalizador Centaur3. Este sistema permite la extracción segura de la memoria externa de 64 GB, en la cual se almacenan los registros sísmicos en formato estándar MiniSEED (MSEED), ampliamente utilizado en el procesamiento de datos sísmicos.

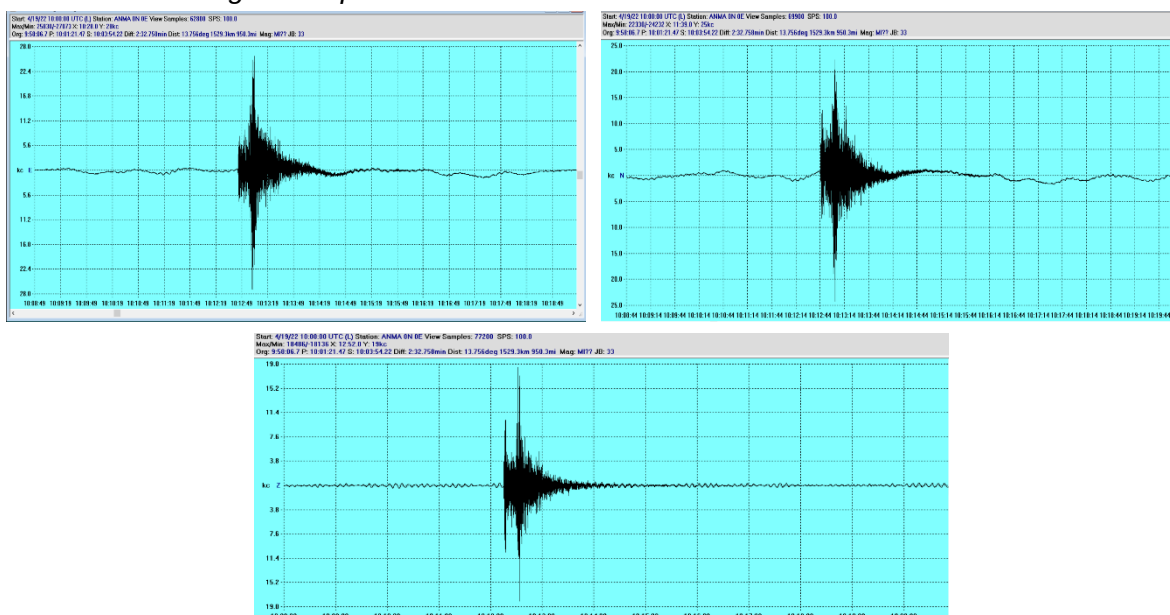
El digitalizador cumple una función esencial al convertir la señal analógica, que representa la velocidad del movimiento del terreno registrada por el sensor sísmico, en una señal digital. Esta conversión se realiza a una frecuencia de muestreo de 100 Hz, lo que garantiza una alta resolución temporal para el análisis de eventos sísmicos.

Los datos digitales generados se organizan en archivos individuales con una duración de una hora, correspondientes a cada uno de los tres canales del sensor triaxial (vertical, norte-sur y este-oeste). El tamaño promedio de cada uno de estos archivos oscila entre 400 y 800 kilobytes, que depende de la actividad sísmica registrada y del nivel de ruido ambiental presente durante el periodo de observación.

En la figura 35, se presenta el registro de una señal sísmica obtenida por la estación 6B.ANMA, correspondiente a los tres canales del sismómetro T120QA: HHE (componente Este-Oeste), HHN (Norte-Sur) y HHZ (Vertical). El evento registrado corresponde a un sismo reportado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), ocurrido el 19 de abril de 2022 a las 05:12:24 (hora local), con epicentro ubicado frente a la costa de Ica. Esta señal muestra con claridad la llegada de las ondas sísmicas principales, lo que permite su análisis en términos de tiempo de arribo, amplitud y características espectrales.

Figura 35

Señal sísmica registrada por la estación 6B.ANMA.



En la figura anterior, el grafico de la izquierda corresponde al registro de una señal sísmica en el canal HHE, mientras que el gráfico de la izquierda es el registro de una señal sísmica por el canal HHN y el grafico inferior corresponde a la señal sísmica registrada por el canal HHZ del sismómetro de banda ancha de la estación 6B.ANMA.

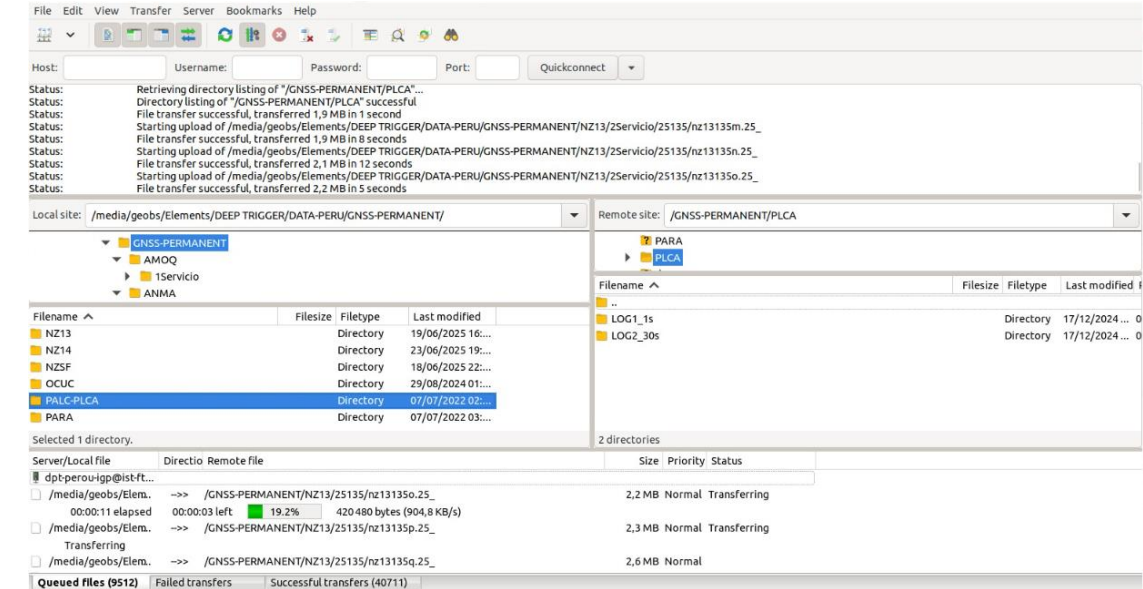
En las estaciones geodésicas, los datos GNSS se almacenan en la memoria interna de 16 GB del receptor Septentrio, con una capacidad suficiente para guardar registros continuos durante un período aproximado de un año, en el formato estándar RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*). En estas estaciones, la recolección de datos se realiza en dos frecuencias distintas: registros de 1 segundo cada hora y de 30 segundos cada 24 horas. Ambos tipos de archivos son organizados en carpetas separadas, identificadas por el número del día juliano correspondiente a la fecha de generación del archivo.

La descarga de los datos se realiza mediante el protocolo de transferencia de archivos (FTP), utilizando el software FileZilla, que permite acceder a la estructura de directorios del receptor. En la figura 36, se muestra el entorno del software, donde el directorio /GNSS-PERMANENTE/PLCA, visible en el panel derecho, corresponde a los

archivos almacenados por el registrador GNSS de la estación geodésica PLCA. Esta metodología facilita la organización, respaldo y posterior procesamiento de los datos de posicionamiento continuo.

Figura 36

Interfaz web del software FileZilla



La tabla 8 muestra el periodo de datos disponibles obtenidos en las estaciones geodésicas en el periodo de noviembre 2021 y diciembre del 2024. Asimismo, se muestra el periodo en que las estaciones no registraron datos debido al robo de paneles solares.

Tabla 8

Periodos de datos disponibles de las estaciones geodésicas

Código de estación	Primer registro de datos	Ultimo registro de datos	Periodo de datos perdidos
ANMA	28/11/2021	30/11/2024	16/09/2024 – 30/11/2024
CAZL	25/11/2021	14/12/2024	13/01/2022 – 26/03/2022
CHIA	04/12/2021	14/12/2024	10/07/2023 – 24/11/2023
COYN	02/12/2021	28/11/2024	
CRVP	29/11/2021	12/12/2024	
OCUC	27/11/2021	28/11/2024	22/09/2023 – 01/06/2024
PARA	30/11/2021	04/12/2024	
PLCA	26/11/2021	27/11/2024	

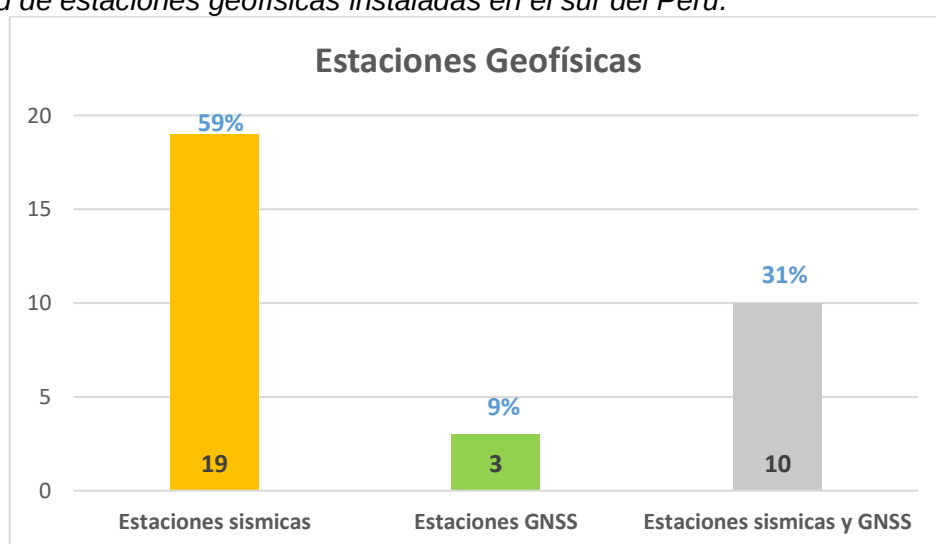
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Cantidad de estaciones geofísicas instaladas

En la tabla 2 y 3 del capítulo anterior se presentó la relación de estaciones geofísicas instaladas en este proyecto. En la figura 37 se muestra de manera grafica el total de estaciones geofísicas según el tipo de estación, siendo un total de 32 estaciones geofísicas de las cuales 24 son estaciones sísmicas y 08 son estaciones geodésicas.

Figura 37

Cantidad de estaciones geofísicas instaladas en el sur del Perú.



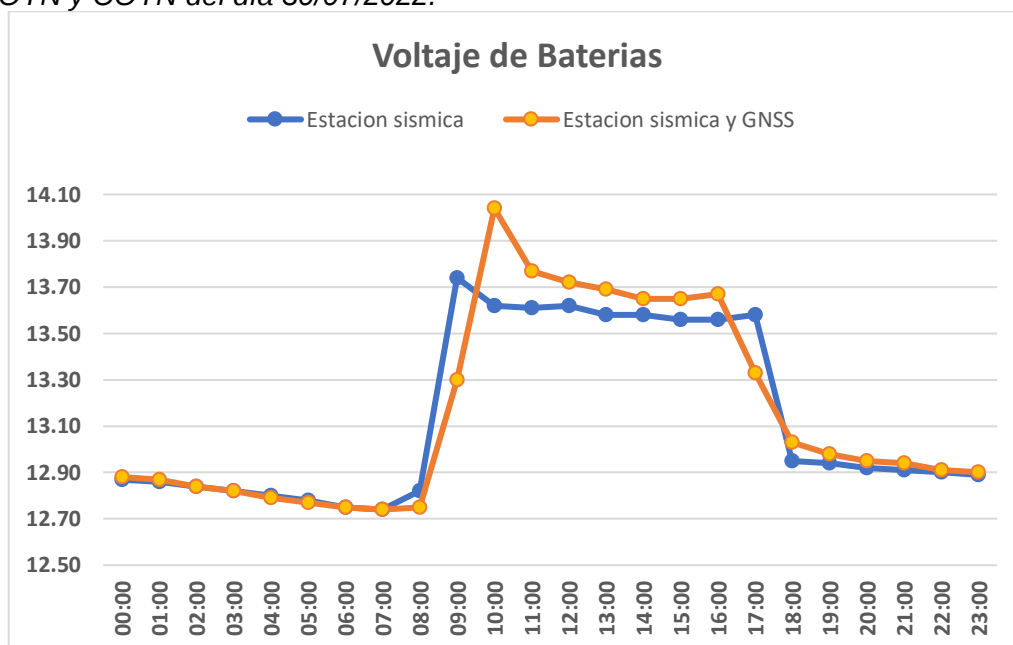
La barra de color naranja muestra el número de estaciones donde solo se ha instalado estaciones sísmicas en el lugar, representando un 59% de la red geofísica; así mismo la barra de color verde muestra el número de estaciones donde solo se ha instalado estaciones geodésicas en el lugar, representando un 9% de la red geofísica. La barra de color gris representa el número de estaciones donde se han instalado tanto estaciones sísmicas como estaciones geodésicas en un mismo lugar, representando un 31% de la red geofísica.

Además, la ubicación de una estación sísmica y una estación geodésica en un mismo lugar reduce el tiempo de instalación, el costo en infraestructura. Así mismo también reduce el tiempo de mantenimiento y recolección de datos de las estaciones.

En el capítulo anterior, se diseñó un sistema de energía autónomo de larga duración para la red geofísica y con los valores de voltaje de la tabla 5, se muestra en la figura 38 el comportamiento de las baterías para el día 30 de julio de 2022 en las siguientes estaciones: 6B.CANO, que alberga una estación sísmica, y 6B.COYN, que comparte ubicación con la estación geodésica COYN.

Figura 38

Carga y descarga de la batería de las estaciones sísmicas y geodésica 6B.CANO, 6B.COYN y COYN del día 30/07/2022.



En la figura 38, la curva de color azul corresponde a la batería de la estación sísmica 6B.CANO, donde se observa que durante horas de la noche esta batería es la encargada del funcionamiento de la estación sísmica por ello ocurre el descenso de voltaje y durante horas de la mañana se carga la batería hasta un voltaje máximo de 13.74V; este mismo comportamiento ocurre para la batería de la estación 6B.COYN y COYN, representado en la curva de color naranja que durante horas de la noche se descarga la batería y se carga durante el día hasta lograr un voltaje máximo de 14.04V. Esta diferencia de voltaje máximo alcanzado por las baterías es debido a que la estación 6B.CANO se encuentra ubicada en la zona sierra de Ica y la estación 6B.COYN se encuentra en la costa de Ica donde hay mayor presencia de luz solar.

La carga y descarga de la batería de manera adecuada y prolongando su vida útil se logra por la tecnología MPPT que utiliza el controlador de carga del sistema fotovoltaico. Esta tecnología permite aprovechar la máxima potencia generada por los paneles solares y almacenar en las baterías sin sobrepasar su capacidad de carga y descarga.

4.2 Análisis de ruido de las estaciones sísmicas 6B.PUVI y 6B.CRVP2

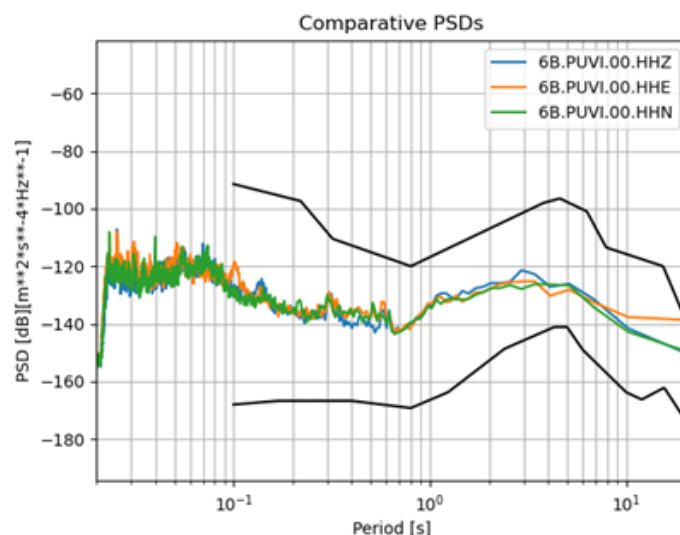
El ruido presente en las señales sísmicas interfiere cuando la densidad espectral de potencia (PDS) de la señal no se encuentra entre los límites establecidos por los modelos de Peterson (1993).

En este proyecto, se ha tenido problemas de ruido después de realizar la instalación en dos estaciones sísmicas 6B.CAMA y 6B.CRVP. La estación 6B.CAMA se encontraba ubicado dentro de una malla metálica que pertenece a la red sísmica nacional del IGP y debido al fuerte viento en la zona producía vibraciones en la malla, que genera interferencia en la señal. En el caso de la estación 6B.CRVP, se ubicó dentro de una garita de seguridad donde se encontraban equipos de telecomunicaciones que producían un fuerte ruido al funcionar. Por ello, se realizó la reubicación de estas estaciones con la finalidad de tener un bajo nivel de ruido presente. El nuevo lugar encontrado se encuentra a 15km y 10km del lugar inicial; por este motivo, se cambió el nombre las estaciones a 6B.PUVI y 6B.CRVP2 respectivamente.

En la figura 39, se muestra el análisis de ruido de la estación 6B.PUVI realizado el día 14/04/2023 y en la figura 40 se muestra el análisis de ruido de la estación 6B.CRVP2 realizado el día 08/08/2022.

Figura 39

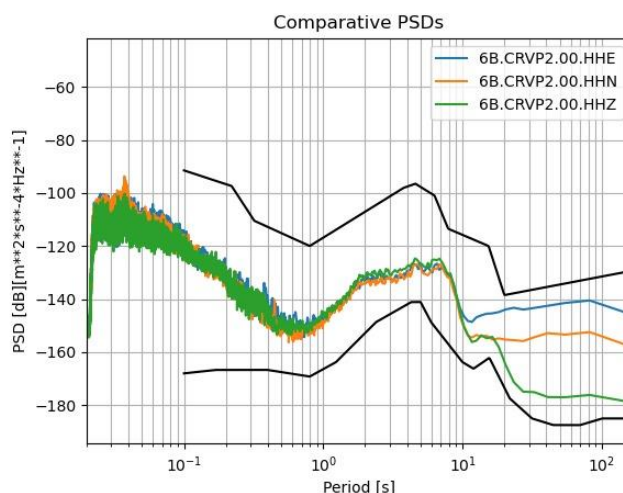
Análisis de ruido de la estación sísmica 6B.PUVI



En la figura anterior, se observa una mejor calidad en la señal en los tres canales del sensor según la densidad espectral de potencia, en comparación con el gráfico del análisis de ruido de la figura 34 para la estación 6B.CAMA.

Figura 40

Análisis de ruido de la estación sísmica 6B.CRVP2



De la figura, se observa una mejor calidad en la señal, en comparación con la figura 34 para la estación 6B.CRVP. El nivel de ruido en los tres canales del sensor se encuentra dentro de los límites según los modelos NLNM y NHNM.

En las estaciones sísmicas que presentaron problemas de ruido al inicio del despliegue de instalación de la red geofísica, estos han sido solucionado con la reubicación

de las estaciones de tal manera de obtener una mejor calidad en la señal y a la vez la seguridad de los equipos.

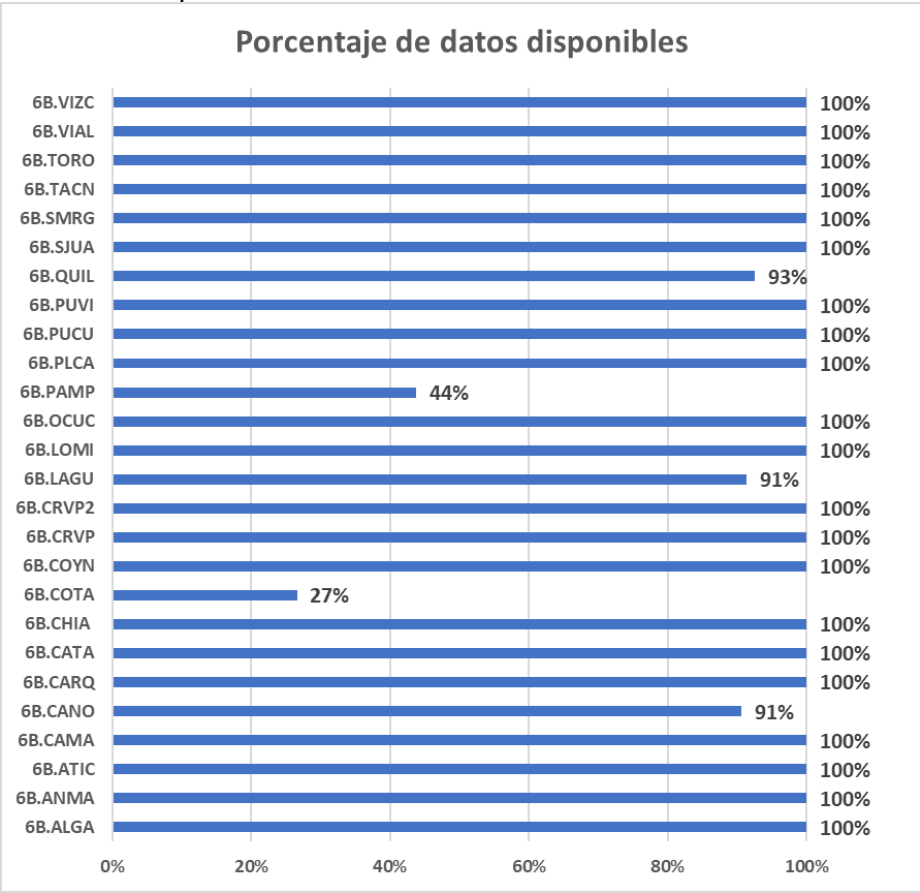
4.3 Disponibilidad de datos de la red geofísica

Las estaciones geofísicas han sido instaladas de manera temporal entre el periodo comprendido de noviembre 2021 y diciembre 2024, durante este tiempo se a recolectado datos de manera permanente sin embargo se ha sufrido pérdidas de datos por motivos externos al diseño de la red geofísica.

En la figura 41 se muestra el porcentaje de datos disponibles de las estaciones sísmicas durante el periodo de marzo del 2022 y diciembre del 2024.

Figura 41

Porcentaje de datos disponibles de las estaciones sísmicas



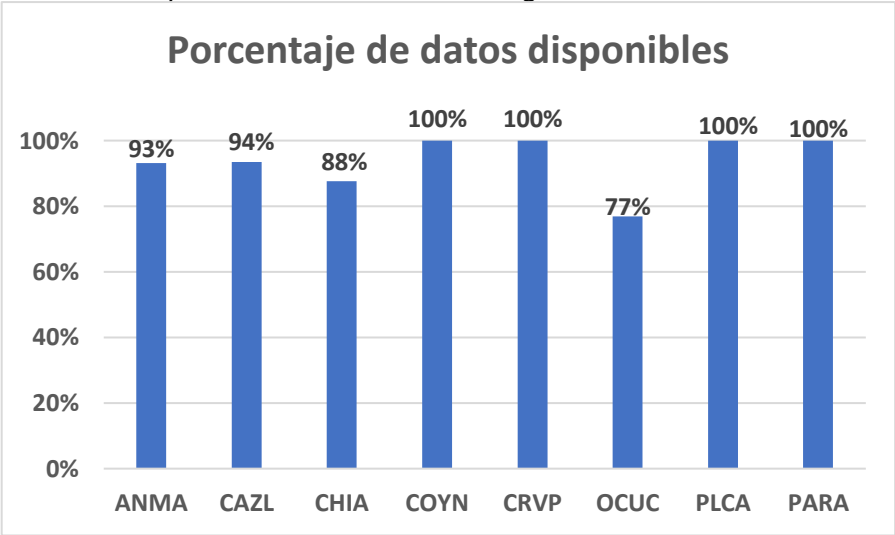
El bajo porcentaje de datos disponibles de las estaciones 6B.COTA y 6B.PAMP es debido a que dichas estaciones fueron robadas. En caso de las estaciones 6B.QUIL,

6B.LAGU y 6B.CANO no se llega al 100% de datos disponibles debido al robo del panel solar que se solucionó en los próximos mantenimientos. En promedio la red sísmica a logrado un 94% de disponibilidad de datos durante el periodo de marzo del 2022 y diciembre del 2024.

El porcentaje de datos disponibles de las estaciones geodésicas durante el periodo de noviembre del 2021 y diciembre del 2024 se muestran en la figura 42.

Figura 42

Porcentaje de datos disponibles de las estaciones geodésicas.



En las estaciones geodésicas ANMA, CAZL, CHIA y OCUC se obtiene porcentaje de 93%, 94%, 88% y 77% respectivamente esto debido a que el cable coaxial que conecta la antena GNSS con el receptor Septentrio fue cortado por personas externas. En promedio, la red geodésica a logrado un 94% de datos disponibles durante el periodo de noviembre del 2021 y diciembre del 2024.

Conclusiones

Las conclusiones del presente trabajo se detallan a continuación:

- Se concluye, a partir de la figura 37, que la red geofísica implementada, en el marco de este proyecto, está conformada por 24 estaciones sísmicas y 8 estaciones geodésicas, distribuidas estratégicamente en diversas localidades del sur del Perú. Estas estaciones fueron diseñadas para operar de forma autónoma y registrar datos in situ, de manera continua durante el período noviembre de 2021 hasta diciembre de 2024, durante el cual se ha logrado una recolección sostenida de datos relevantes para el estudio.
- Se concluye, de la figura 38, que la red geofísica implementada en este proyecto opera de forma autónoma gracias al uso de energía solar fotovoltaica, lo cual resulta fundamental para garantizar el funcionamiento continuo de las estaciones. El sistema aprovecha, de manera eficiente, la energía generada por los paneles solares, gracias a la incorporación de la tecnología *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) en los controladores de carga, que permiten optimizar la captación de energía incluso en condiciones variables de radiación solar.
- Se concluye, a partir de las figuras 39 y 40, que los modelos de referencia de ruido sísmico ambiental NLNM (*New Low Noise Model*) y NHNM (*New High Noise Model*), desarrollados por Peterson, fueron fundamentales para la evaluación del desempeño de las estaciones durante la fase de instalación de la red geofísica. Estos modelos permiten comparar el espectro de ruido registrado por las estaciones con valores estándares globales, que identifica así aquellas que presentan niveles elevados de ruido sísmico, ya sea por causas naturales o antrópicas. Este análisis permitió detectar que las estaciones 6B.CRVP2 y 6B.PUVI mostraban una alta presencia de ruido en sus registros originales. Como resultado, se procedió a su reubicación en sitios con mejores condiciones ambientales y menor interferencia, lo

que derivó en una mejor calidad de los datos sísmicos recolectados y, por tanto, en un funcionamiento más eficiente de la red instalada.

- Se concluye, de las figuras 41 y 42, que la disponibilidad de datos registrados, durante el periodo de noviembre del 2021 y diciembre del 2024, es del 94%, tanto para las estaciones sísmicas como para las estaciones geodésicas. El 6% restante representa a los datos perdidos por motivos externos al diseño de la instalación de la red geofísica.

Recomendaciones

Las recomendaciones del presente trabajo se detallan a continuación:

- A partir de la figura 37, se recomienda instalar las estaciones sísmicas y geodésicas en una misma ubicación geográfica, siempre que las condiciones técnicas lo permitan. Esta estrategia permite optimizar recursos operativos, ya que reduce significativamente los tiempos y costos asociados a la instalación, el mantenimiento y la recolección de datos.
- De las figuras 38 y 39, se recomienda ubicar las estaciones sísmicas en zonas alejadas de centros poblados y de fuentes de ruido artificial, lo cual minimizaría el ruido ambiental captado por los sensores y mejora así la calidad de los datos sísmicos registrados.
- De las figuras 40 y 41, se recomienda el desarrollo e implementación de un sistema de transmisión de datos en tiempo real para las estaciones geofísicas, lo que permitiría no solo monitorear el estado operativo de cada estación de forma remota, sino también detectar de manera inmediata fallas, interrupciones en el suministro eléctrico o intentos de sabotaje. Además, se sugiere complementar este sistema con una estrategia de vigilancia continua, ya sea mediante software o supervisión técnica periódica, con el fin de minimizar la pérdida de datos, fortalecer la eficiencia, seguridad y confiabilidad de la red geofísica.

Referencias bibliográficas

- Audemard, F. A., Reinoza, C., Lopez, R., Feaux, K., y Jouanne, F. (2020). Instalación de estaciones geodésicas de monitoreo continuo para fines geocientíficos en el margen caribe sureste. *Boletín de Geología*. doi: 10.18273/revbol.v42n2-2020001
- Brown, A., Smith, J. y Jones, M. (2019). Challenges in the implementation of geophysical networks in subduction zones. *Journal of Seismology*, 23(4), 567-589.
- Bui, P., Gaillard, P. y Cano, Y. (2015). Association of array processing and statistical modelling for seismic event monitoring. 1945-1949. 10.1109/EUSIPCO.2015.7362723.
- Centro Sismológico Nacional. (2025). *Glosario de sismología*. Universidad de Chile. <https://www.csn.uchile.cl/sismologia/glosario/>
- El País Honduras. (2025). *Actividad sísmica en el Pacífico: Placa de Nazca se reactiva y pone en alerta a Perú, Chile, Ecuador y Colombia*. El País Honduras. <https://www.elpais.hn/actividad-sismica-en-el-pacifico-la-placa-de-nazca-se-reactiva-y-pone-en-alerta-a-peru-chile-ecuador-y-colombia/>
- FDSN (2025). *Federación Internacional de Redes de Sismógrafos Digitales*. FDSN. <https://www.fdsn.org/about/>
- García, L., & Romero, P. (2015). *Introducción a los sistemas digitales*. Alfaomega.
- González, E., & Blanco, M. (2013). *Fundamentos de electrónica analógica*. McGraw-Hill.
- Haendel, J. (2013). *Diseño de la Red Sísmica Digital por Satélite Haitiana* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/34109/7/TESIS_MASTER_JEAN_MICHAEL_HAENDEL_DORFEUILLE.pdf
- Havskov J. y J. Alguacil (2002) *Instrumentation in Earthquake Seismology*. Institute of Solid Earth Physics University of Bergen Norway and Instituto Andaluz de Geofísica University of Granada Spain.
- Havskov, J., y Alguacil, G. (2004). *Instrumentation in earthquake seismology*. Springer.

- Havskov, J., Bormann, P., y Schweitzer, J. (2012). Seismic source location. In New Manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP-2). *Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ*, 1(1), 1-36
- IGP. (2025). *Mapas sísmicos*. Instituto Geofísico del Perú. <https://ultimosismo.igp.gob.pe/mapas-sismicos>
- IGP. (2025). *Glosario*. Instituto Geofísico del Perú.. <https://ultimosismo.igp.gob.pe/glosario>
- Incorporated Research Institutions for Seismology. (2012). *Seed reference manual,IRIS*. https://www.fdsn.org/pdf/SEEDManual_V2.4.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2024). *IGAC actualiza los formatos RINEX de la Red Geodésica Nacional*. IGAC. <https://www.igac.gov.co/noticias/igac-actualiza-los-formatos-rinex-de-la-red-geodesica-nacional>
- Jaiswal, R. y Mistra, S. (2008). *Seismic Instrumentation: Indian Perspective*. Indian National Centre of Ocean Information Services and National Geophysical Research Institute.
- Kearey, P., Klepeis, K. y Vine, F. (2009). *Global Tectonics*. Wiley-Blackwell
- Kumar, D., & Ahmed, I. (2021). *Seismic noise*. En H. K. Gupta (Ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics* (pp. 1442–1447). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58631-7_146
- Lay, T. y Wallace, C. (1995). *Modern global seismology*. Academic Press
- Mamani, C. (2021). *Determinación de límites mínimos y máximos de los niveles de ruido sísmico en las estaciones de la red sísmica nacional del Perú*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5011>
- Medina, C. (2016). *Evaluación de los niveles de ruido sísmico en la red sísmica satelital para la alerta temprana de tsunamis a cargo del instituto geofísico del Perú*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/3206>
- Miyara, F. (2004). *Señales analógicas y digitales*. Universidad Nacional de Rosario.

- Nixon, G. (1982). The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere. *GSA Bulletin* 1982, 93 (6), 514–523. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1982\)93<514:TRBQVI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1982)93<514:TRBQVI>2.0.CO;2)
- Orbegozo, C. y Arivilca, R. (2010). *Manual técnico para instalaciones domiciliarias*. GREEN ENERGY.
https://issuu.com/sinapsisarcar/docs/energ__a_solar_fotovoltaica__manual/18
- OSUG. (2025). *Observatorio de Ciencias del Universo de Grenoble*. DEEPtrigger.
<https://deeptrigger.osug.fr/>
- Peterson, J. (1993). *Observations and modeling of seismic backgroundnoise*. U.S. Geol. Survey Open-File Report 93-322. <https://doi.org/10.3133/ofr93322>
- Red Sismica de Puerto Rico. (2025). *¿Qué es la red sismica de Puerto Rico?* RSPR.
https://redsismica.uprm.edu/spanish/nuestro_trabajo/mision.php
- Red Sismica de Puerto Rico. (2025). *¿Qué es un terremoto?* RSPR.
https://redsismica.uprm.edu/spanish/educacion/informacion_terremotos.php
- Smith, J. y Jones, M. (2020). The importance of geophysical networks for early earthquake detection. *Geophysical Research Letters*, 47(2), 123-135.
- Tanaka, H., y Yamamoto, K. (2018). Case study of geophysical network implementation in Japan. *Earthquake Science*, 31(1), 45-58.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2018). *Earth: An introduction to physical geology* (12.^a ed.). Pearson.
- Tavera, H. (2020). *Análisis y evaluación de los patrones de sismicidad y escenarios sísmicos en el borde occidental del Perú*. IGP.
<http://hdl.handle.net/20.500.12816/4893>
- Townsend, B. (2014). *Symmetric triaxial seismometers*. Nanometrics.
https://nanometrics.ca/hubfs/Downloads/Whitepapers/symmetric_triaxial_seismometers_bruce_townsend.pdf

- Trnkoczy, A., & Havskov, J. (2011). *Seismological instrumentation*. In J. Havskov & L. Alguacil (Eds.), *Instrumentation in Earthquake Seismology* (pp. 17–82). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-0152-6_2
- U.S. Geological Survey. (2021). *What is an earthquake and what causes them to happen?*
 U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/faqs/what-earthquake-and-what-causes-them-happen>
- U.S. Geological Survey. (2025). *Seismic signals have unique signatures for different types of ground movement*. Volcano Hazards Program.
<https://www.usgs.gov/programs/VHP/seismic-signals-have-unique-signatures-different-types-ground-movement>
- Villegas, J. (2020). *Deformación Cortical y Potencial Sísmico en la Zona de Subducción del Perú*. IGP
https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/13937_deformacion-cortical-y-potencial-sismico-en-la-zona-de-subduccion-del-peru.pdf .
- Wielandt, E. (2002). *Seismometry*. International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology.
https://moodle2.units.it/pluginfile.php/8996/mod_resource/content/1/Seismometry-Cours-WIELANDT.pdf
- Zafra, O. (2018). *Ondas sísmicas, su importancia para la geofísica y la humanidad*. Universidad Industrial de Santander
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20029.08168>

Anexos

Anexo 1: Ficha técnica de antena GNSS tallysman modelo VeraPhase 6000	1
Anexo 2: Ficha técnica del receptor septentrio modelo AsteRx SB ProConnect	5
Anexo 3: Ficha técnica del sensor trillium compact 20s	6
Anexo 4: Ficha técnica del sensor trillium 120	7

Anexo 1

Ficha técnica de antena GNSS Tallysman modelo VeraPhase 6000

When precision matters.™

VeraPhase® 6000 Antenna

High Precision Full GNSS Spectrum Antenna

The patented VeraPhase® 6000 antenna is a full GNSS spectrum antenna plus L-band correction services. It has consistent performance (gain, axial ratio, PCV, and PCO) across the full bandwidth of the antenna. It provides the lowest axial ratios (horizon to horizon, over all azimuths) across all GNSS frequencies (<0.5dB at zenith, <2 dB typ. at horizon). It has an exceptional front to back ratios, high efficiency (>70%), a tight PCV, and near constant PCO for all azimuth and elevation angles, over all in-band frequencies. The performance of the VeraPhase® rivals any geodetic / reference antennas including choke ring antennas but is lighter, smaller, more economical, and requires less power. The antenna has been calibrated by GEO++ and the type mean calibration files are available in the IGS and NGS databases.

The VP6000 provides high receive gain over the full GNSS spectrum: Low GNSS band (1164MHz to 1300MHz) L-band correction services (1525MHz to 1559MHz) and High GNSS band (1559MHz to 1610 MHz). It has a robust pre-filtered LNA, with high IP3 to minimize de-sensing from high-level out-of-band signals, including 700MHz LTE, while still providing a noise figure of less than 2.0dB.

An uncommitted PCB is available within the base of the antenna for integration of a custom system board such as a PPP or RTK GNSS receiver or other applications.

Applications

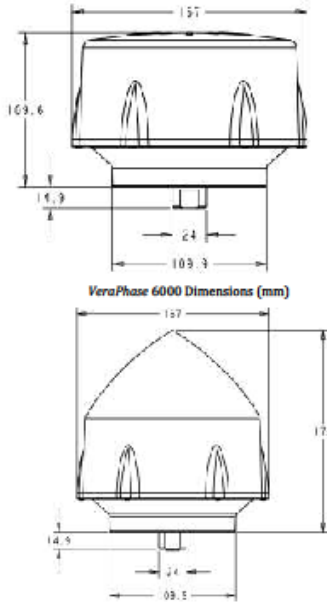
- Survey
- High Precision GNSS systems
- Custom OEM Products
- RTK / PPP systems
- Reference Networks
- Monitoring Stations

Features

- Low axial ratios from horizon to horizon
- Very Tight Phase Center Variation (<1mm)
- Low current (35mA)
- Invariant performance from: +2.7 to 24 VDC
- Space in housing for integrated PPP, RTK

Benefits

- Consistent performance across all frequencies
- Broadest tracking elevation (0° - 180°)
- Extreme precision
- Excellent multipath rejection
- IP67, REACH, and RoHS compliant
- Reduced time to market



VeraPhase 6000 Dimensions (mm)

www.tallysman.com



When precision matters.™

VeraPhase® 6000 – High Precision Full GNSS Constellation Antenna

Specifications (Measured @ Vcc = 3V, and Temperature=25°C)

Antenna

Antenna Gain	5 dBic to 7 dBic (all Frequency Bands)
Efficiency	>70%
Axial Ratio, over full bandwidth	< 0.5 dB at zenith, (refer to table below for other elevations)
Phase Centre Variation	± 1 mm across all frequencies (see graphs on following pages)
Phase Centre Offset (RMS)	± 0.2 mm across all frequencies
IGS model available	Yes
NGS model available	Yes

Electrical

Available LNA Configurations	35 dB, 50 dB or 15dB OEM
Gain Variation with Temperature	3dB max over operational temperature range
LNA Gain Flatness	1.5 dB over frequency range
P1dB Output	+12 dBm
Bandwidth	1164 – 1300 MHz plus 1559 – 1610 MHz plus 1525 – 1559 MHz,
LNA Noise Figure	2.0dB typ. at 25°C
VSWR (at LNA output)	<1.5:1 max.
Supply Voltage Range	+2.7 to 24VDC nominal
Supply Current	<35mA (35dB gain) <45 mA (50dB gain)
Out of Band Rejection	<800MHz >60dB <900MHz 28dB <1000MHz 15dB (min) 1430MHz 25dB >1690MHz 25dB (min) >1710MHz >60dB
Group Delay variation	<5 ns

Mechanicals & Environmental

Mechanical Size	See drawing on page 1
Antenna Reference Plane (ARP)	Bottom of 5/8" thread
North Orientation Indicator	Mark on radome above connector
Operating Temperature Range	-40°C to +85°C
Weight	<800g (flat radome), 820g (conical radome)
Mounting Thread	5/8"x 11 TPI female
Environmental	IP67, RoHS and REACH compliant
Shock	Vertical axis: 50 G, other axes: 30 G
Vibration	MIL STD 810D,

Ordering Information:

VeraPhase 6000 with 35 dB LNA, flat white radome	33-603500-xx-00-11
VeraPhase 6000 with 50 dB LNA, flat white radome	33-605000-xx-00-11
VeraPhase 6000 with 35dB LNA, conical white radome	33-603500-xx-00-01
VeraPhase 6000 with 50dB LNA, conical white radome	33-605000-xx-00-01
Where xx = 01 for TNC or 14 for N-Type	

The information provided herein is intended as a guide only and is subject to change without notice. This document is not to be regarded as a guarantee of performance. Tallysman Wireless Inc. hereby disclaims any or all warranties and liabilities of any kind. © 2015 Tallysman Wireless Inc. All rights reserved

Rev 3.1

www.tallysman.com

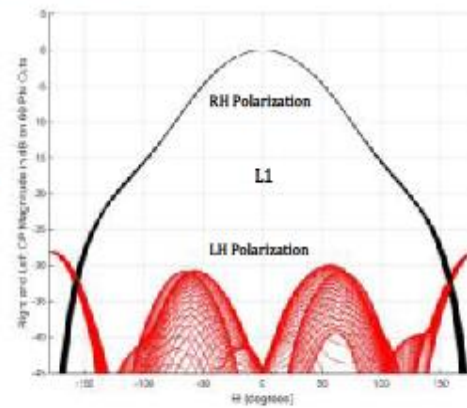
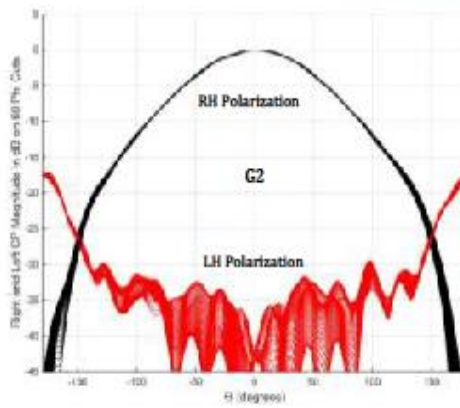


When precision matters.™

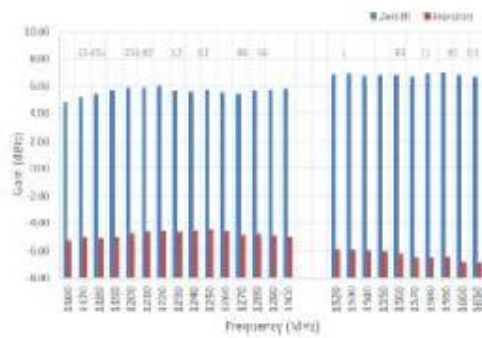
VeraPhase® 6000 – High Precision Full GNSS Spectrum Antenna

Antenna radiating performances

Normalized radiation patterns



Gain

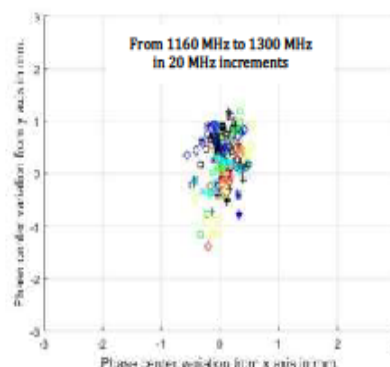
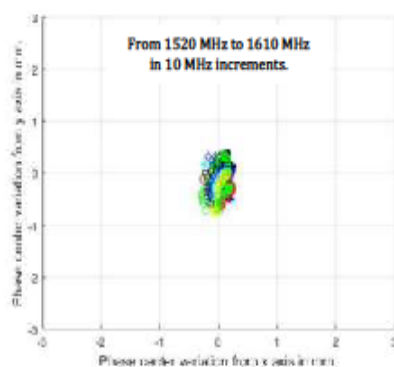




When precision matters.™

VeraPhase® 6000 – High Precision Full GNSS Spectrum Antenna

Phase center variation



Axial ratio (dB) (typical) - Flat Radome							
Elevation	L5 - E5a	E5b - B2 - G3	L2 - G2	B3	E6	L1 - E1 - B1	G1
90°	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4
30°	1.5	1.5	1.3	1	1.5	1.2	1.2
10°	2	1.8	1.4	1.8	2.2	2	2.2
Axial ratio (dB) (typical) - Conical Radome							
Elevation	L5 - E5a	E5b - B2 - G3	L2 - G2	B3	E6	L1 - E1 - B1	G1
90°	0.5	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4
30°	1.8	1.7	1.3	1.2	1.5	1.5	1.5
10°	2.2	1.8	1.5	2	2.5	2.5	2.8

Tallysman Wireless Inc

36 Steacie Drive
Ottawa ON K2K 2A9 Canada
Tel +1 613 591 3131 Fax 613 591 3121
sales@tallysman.com

The information provided herein is intended as a guide only and is subject to change without notice. This document is not to be regarded as a guarantee of performance. Tallysman Wireless Inc. hereby disclaims any or all warranties and liabilities of any kind. © 2015 Tallysman Wireless Inc. All rights reserved. Rev 3.2

Anexo 2

Ficha Técnica del receptor Septentrio modelo AsteRx SB ProConnect

AsteRx SB ProConnect

FEATURES

GNSS technology

448 Hardware channels for simultaneous tracking of all visible satellite signals:

- GPS: L1 C/A, L1C, L2C, L2 P(Y), L5
- GLONASS: L1 C/A, L2C/A, L3, L2P
- BeiDou: B1I, B1C, B2a, B2b, B2I, B3I
- Galileo: E1, E5a, E5b
- QZSS: L1 C/A, L1 C/B, L2C, L5
- NavIC: L5
- SBAS: EGNOS, WAAS, GAGAN, MSAS, SDCM

Septentrio's patented GNSS+ technologies

- **AIM+** industry leading anti-jamming, anti-spoofing interference monitoring & mitigation technology
- **APME+** a posteriori multipath estimator for code and phase multipath mitigation
- **LOCK+** superior tracking robustness under heavy mechanical shocks or vibrations
- **IONO+** advanced scintillation mitigation

RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring)

RTK (base and rover)¹

PPP (Precise Point Positioning with SECORX-S)^{1,2}

Moving base^{1,3}

Formats

Septentrio Binary Format (SBF), fully documented with sample parsing tools

NMEA 0183 v2.3, v3.01, v4.0 (output only)

RINEX⁴ (obs, nav) v2.x, v3.x

RTCM v2.x and v3.x (MSM included)

CMR v2.0 and CMR+ (CMR+ input only)

Connectivity

3 Hi-speed serial ports (RS232)

Ethernet port (TCP/IP, UDP, LAN 10/100 Mbps)

Power over ethernet

1 High-speed/full-speed USB device port

1 USB OTG port (with support for external disk)

2 Event markers¹

xPPS output (max. 100 Hz)

Integrated bluetooth (2.1 + EDR/4.0)

Integrated WiFi (802.11 b/g/n)

NTRIP (server, client, caster)

FTP server, FTP push¹, SFTP

2 simultaneous logging sessions

16 GB internal memory

PERFORMANCE

Position accuracy^{4,5}

	Horizontal	Vertical
Standalone	1.2 m	1.9 m
SBAS	0.6 m	0.8 m
DGNSS	0.4 m	0.7 m

RTK performance^{4,5,7,8}

Horizontal accuracy	0.6 cm + 0.5 ppm
Vertical accuracy	1 cm + 1 ppm
Initialisation	7 s

Velocity accuracy^{4,5}

0.03 m/s

Maximum update rate

Position	100 Hz
Measurements	100 Hz

Latency⁶

<10 ms

Time precision

xPPS out ¹⁰	5 ns
Event	< 20 ns

Time to first fix

Cold start ¹¹	< 45 s
Warm start ¹²	< 20 s
Re-acquisition	avg. 1 s

Tracking performance (C/N0 threshold)

Tracking	20 dB-Hz
Acquisition	33 dB-Hz

STANDARD SYSTEM COMPONENTS

- On board Web UI and RxTools desktop software for all receiver controls and monitoring.
- GNSS receiver communication SDK. Available for both Windows and Linux.
- Other accessories (cables, mounting brackets, antennas, etc.) are available.

PHYSICAL AND ENVIRONMENTAL

Size 102 x 36 x 111 mm / 4.0 x 1.4 x 4.4 in

Weight 460 g/1.01 lb

Input voltage 4.5 to 36 VDC

Power consumption 1.5 W typical

Connectors

Antenna	TNC female
ETH	ODU 4 pins female
COM1/GPIO	ODU 7 pins female
PWR/USB/COM2/COM3	ODU 7 pins female
USB OTG	Micro USB

Antenna LNA power output

Output voltage	5 VDC
Maximum current	200 mA

Environment

Operating temperature	-30° C to +65° C -22° F to 149° F
Storage temperature	-40° C to +75° C -40° F to 167° F

Humidity MIL-STD-810G, Method 507.5, Procedure I

Dust MIL-STD-810G, Method 510.5, Procedure I

Shock MIL-STD-810G, Method 516.6, Procedure VII

Vibration MIL-STD-810G, Method 514.6, Procedure I

Certification

IP68, RoHS, WEEE, CE, UKCA, ISO 9001-2015
IEC 60950



¹ Optional feature

² Service subscription required

³ Maximum output rate is 20 Hz

⁴ Open sky conditions

⁵ RMS levels

⁶ After convergence

⁷ RTK fixed ambiguities

⁸ Baseline < 40 Km

⁹ 99.9%

¹⁰ Including software compensation of sawtooth effect

¹¹ No information available (no almanac,
no approximate position)

¹² Ephemeris and approximate position known

* Specifications subject to change without notice. Certain features and specifications may not apply to all models. © 2023 Septentrio NV. All rights reserved.

BB1-60/05/2023

Anexo 3

Ficha Técnica del sensor Trillium compact 20s

TECHNICAL SPECIFICATIONS TRILLIUM COMPACT PH

Specifications subject to change without notice

TECHNOLOGY

Topology: Symmetric triaxial
Feedback: Force balance with capacitive transducer
Mass Centering: Not required

SEISMOMETER MODULE PERFORMANCE

Self-noise: See self-noise graph
Sensitivity/120 models: (Nominal) 750 V-s/m;
 (Actual) 754.3 V-s/m $\pm 0.5\%$
Sensitivity/20 models: (Nominal) 750 V-s/m;
 (Actual) 753.1 V-s/m $\pm 0.5\%$
Accuracy: $\pm 0.5\%$ relative to User Guide specification
Bandwidth/120s: -3 dB points at 120 s and 108 Hz
Bandwidth/20s: -3 dB points at 20 s and 108 Hz
Clip level: 26 mm/s up to 10 Hz and 0.17 g above 10 Hz
Oper. Tilt Range/120s: $\pm 2.5^\circ$
Oper. Tilt Range/20s: $\pm 10^\circ$
Parasitic Resonances: None below 200 Hz
Dynamic Range/120s: 159 dB @ 1 Hz
Dynamic Range/20s: 156 dB @ 1 Hz

LEVELING AND ALIGNMENT

Digital bubble level: Graphical bullseye level is available via Centaur digital recorder GUI
Physical Bubble level: Optional accessory
Alignment: Vertical scribe marks for (N and S); precision guide in cover for straight-edge, line, or laser level

INTERFACE

Connector: 16-pin, marine SubConn, top-mounted (for models TC120-PH2-XH, TC20-PH2-XH) SubConn MCBH16MNM (for all other models) SubConn MCBH16MSS
Velocity Output: 40 V peak-to-peak differential
 • Selectable XYZ or U/V/W mode
Mass Position Output: Single ± 4 V output representing maximum mass position
 • 3-channel mass positions available through serial port
Calibration Input: Single voltage input and one active high control signal to enable all 3 channels
 • Remote calibration in XYZ or U/V/W mode
 • Independent channel selection by serial port
Control Lines: Cal. Enable or Long/Short Period mode, XYZ/U/V/W mode
Serial Port:
 • RS-232 compatible serial IP (SLIP) with onboard HTTP web server to select sensor operating modes, and to access state-of-health, virtual level bubble, firmware updates and metadata
 • Plug-and-Play automated workflow interface to select sensor operating modes, and to access state-of-health, virtual level bubble and metadata

AVAILABLE MODELS

TC120-PH2: 120 second Standard Model
TC120-PH2-XC: 120 second Polar Certified Model
TC120-PH2-XH: 120 second Plastic Connector
TC20-PH2: 20 second Standard Model
TC20-PH2-XC: 20 second Polar Certified Model
TC20-PH2-XH: 20 second Plastic Connector

POWER

Supply Voltage: 9 to 36 VDC isolated input
Power Consumption:
 • 180 mW typical (model TC120-PH2)
 • 220 mW typical (model TC20-PH2)
Protection: Reverse-voltage and over-voltage protected
 • Self-resetting over-current protection

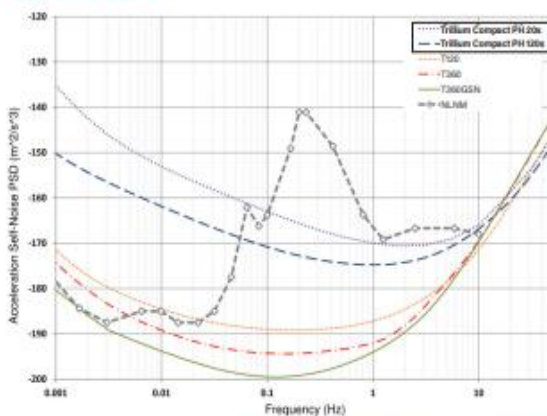
PHYSICAL

Diameter: 97 mm
Height:
 • Body & connector: 160 mm
 • On fixed studs: 167 mm
Weight/120s: 3.2 kg
Weight/20s: 3.2 kg
Housing: Stainless steel, resistant to corrosion, scratches & chips

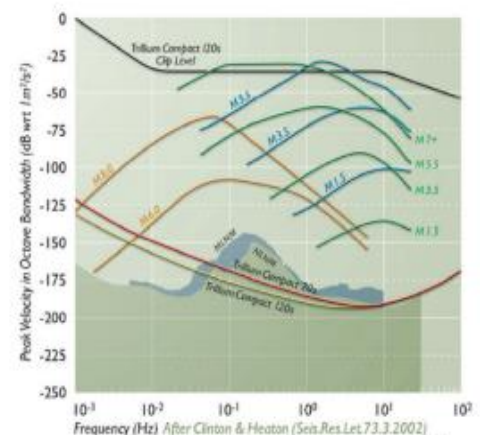
ENVIRONMENT

Operating temperature:
 -20°C to 60°C (Standard Model)
 -50°C to 60°C (Polar Certified Model)
Storage temperature:
 -40°C to +70°C (Standard Model)
 -60°C to +70°C (Polar Certified Model)
Shock:
 • 100 g half sine, 5 ms without damage, 6 axes
 • No mass lock required for transport
Magnetic: Insensitive to natural variations of the earth's magnetic field
Ingress Protection: Rated to IP68 to 300 m for prolonged immersion
Humidity: 0% to 100% (submersible)

SELF-NOISE GRAPH



Seismometer self-noise plotted against NLNM (after Peterson, 1993) and NLNM (after McNamara and Buland, 2004)



Frequency (Hz) After Clinton & Heaton (Seis.Res.Let.73.3.2002)

■ Local events ~10 km Several seconds to 30 Hz
 ■ Regional ~100 km 30 seconds to 10 Hz
 ■ Teleseismic ~3000 km 3600 seconds to 2 seconds

Note: Sensor noise floors and earth noise models have been converted to equivalent peak amplitudes using a full octave bandwidth assuming Gaussian distribution and 95% probability.

Anexo 4

Ficha Técnica del sensor Trillium 120

Trillium I20Q/QA

Specifications subject to change without notice.

PERFORMANCE

Self-noise	See plot at right
Sensitivity	1200V-s/m [Reference User Guide for precise value]
Precision	± 0.5% relative to User Guide specification
Bandwidth	-3dB points at 120 s and 150 Hz
Clip Level	>16.6 mm/s up to 10 Hz and 0.17 g above 10 Hz
Temperature	± 45°C without re-centering

INTERFACE

Connector	19-pin MIL-C-26482
Velocity Output	40V peak-to-peak differential Selectable XYZ or UVW mode
Mass Position	Three independent voltage outputs
Calibration Input	Single voltage input with one active-high control signal per channel; Calibration with XYZ or UVW
Control Lines	Auto-level & Mass Center, Calibration Enable, XYZ/UVW mode
Serial Port	RS-232 compatible serial IP (SLIP) Onboard web server standard HTTP For enhanced instrument control and status: 120 QA - automatic mass centring / 120 Q - manual mass centring, UVW/XYZ mode, short/long period mode, firmware updates, temperature, mass position, case tilt, instrument status, serial number and factory info

POWER

Supply Voltage	9 to 36 Volts DC isolated input
Power Consumption	560 mW typical at 12V input
Protection	Reverse-voltage protection Auto-resettable over-current protection (No fuse to replace)

TECHNOLOGY

Topology	Symmetric triaxial
Feedback	Force balance with capacitive transducer
Mass Centering	Automatic motorized re-centering, can be remotely initiated [T120-QA-SV1]
Leveling	Integrated bubble level; Adjustable locking leveling feet
Alignment	Vertical scribe marks for [N and S]; Precision guide in cover for straight-edge, line or laser level; 5/16" holes for alignment rods [E & W]

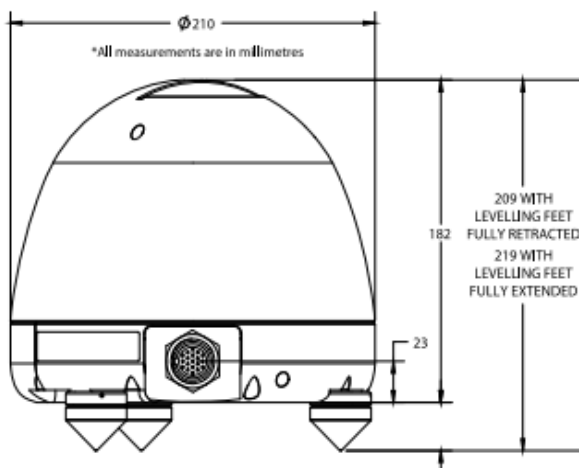
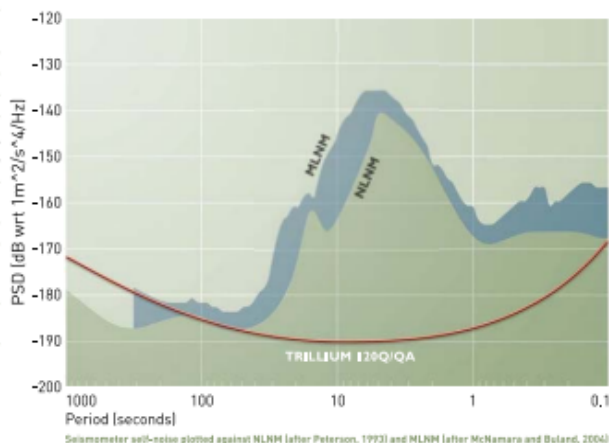
PHYSICAL

Diameter	21.0 cm
Height	21.4 cm +/- 0.5 cm depending on leveling feet extension
Weight	7.2 kg
Height	238 mm (9.37 in.), including connector
Handling	Detachable lifting handle on lid

ENVIRONMENTAL

Operating Temp.	-20°C to +60°C [Ultra-low temperature option available. Please contact Nanometrics.]
Storage Temp.	-40°C to +70°C
Optional	Insulating cover available for quick and convenient installation
Humidity	0 to 100%
Shock	20g half sine, 5 ms without damage, 6 axis No mass lock required for transport
Packaging	Rated to IP68 and NEMA6P for outdoor use

SELF-NOISE PERFORMANCE PLOT



Nanometrics Inc. 250 Herzberg Road, Kanata, Ontario, Canada K2K 2A1
613-592-6776 Fax: 613-592-5929 sales_mkt@nanometrics.ca www.nanometrics.ca
1001.05.04 PRINTED IN CANADA

