

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE
AREQUIPA**

Facultad de Geología, Geofísica y Minas
Escuela Profesional de Ingeniería Geofísica



**EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE
RUIDO SÍSMICO EN LA RED SÍSMICA SATELITAL
PARA LA ALERTA TEMPRANA DE TSUNAMIS A CARGO
DEL INSTITUTO GEOFÍSICO DE PERÚ**

Tesis presentada por el Bachiller
en Ciencias Geofísicas:

CRISTOPHER JESUS MEDINA SAMANEZ

Para optar el Título Profesional
de INGENIERO GEOFÍSICO

ASESOR EXTERNO:

Dr. Hernando Tavera

ASESOR INTERNO:

Dr. Armando Minaya Lizarraga

Arequipa-Perú
2016

Índice

Índice

Índice de Figuras

Índice de Tablas

RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
CAPÍTULO I.....	15
INTRODUCCIÓN.....	15
1.1.-Generalidades.....	15
1.2.-Área de Estudio.....	16
1.3.-Problema de la Investigación.....	18
1.4.-Objetivos.....	18
1.4.1.-Objetivos Generales.....	18
1.4.2.-Objetivos Específicos.....	18
1.5.-Justificación.....	19
1.6.-Hipótesis de la Investigación.....	19
CAPÍTULO II.....	20
INSTRUMENTAL SÍSMICO.....	20
2.1.-Generalidades.....	20
2.1.1.-Principio Fuerza-Balance.....	20
2.1.2.-Sismómetros de banda ancha.....	22
2.1.3.-Modelo Físico de un Sismómetro.....	23
2.1.4.-Función Respuesta.....	24
2.1.5.-Función Transferencia.....	26
2.2.-Parámetros del Sensor.....	28
2.2.1.-Respuesta frecuencial.....	28
2.2.2.-Sensitividad.....	28
2.2.3.-Rango dinámico.....	28
2.2.4.-Linealidad.....	29
2.2.5.-Sensitividad del Eje Cruzado.....	30
2.3.-Sismómetros de la REDSSAT-IGP.....	30
2.3.1.-Trillium Compact.....	30
2.3.1.1.-Especificaciones técnicas.....	31
2.3.1.2.-Ruido instrumental.....	33
2.3.1.3.-Rango Dinámico.....	34
2.3.1.4.-Función Transferencia.....	35
CAPÍTULO III.....	37
REDES SÍSMICAS.....	37
3.1.-Generalidades.....	37
3.2.-Objetivos de una Red Sísmica.....	37
3.2.1.-Determinación de Epicentros.....	38
3.2.2.-Monitoreo de la Sismicidad.....	38
3.2.3.-Registro y Almacenamiento de Información.....	39

3.3.-Geometría de la Red.....	39
3.4.-Despliegue de Estaciones Sísmicas.....	41
3.4.1.-Consideraciones Energéticas.....	41
3.4.2.-Consideraciones de Comunicación.....	41
3.4.3.-Consideraciones de Seguridad.....	41
3.4.4.-Consideraciones de Accesibilidad.....	42
3.4.5.-Consideraciones Climáticas.....	42
3.4.6.-Consideraciones Topográficas.....	42
3.4.7.-Consideraciones Geológicas.....	42
3.4.8.-Consideraciones de Ruido Sísmico.....	42
3.5.-Elección de los Sensores Sísmicos.....	43
3.5.1.-Tipo de Sensor.....	43
3.5.2.-Número de Componentes.....	44
3.5.3.-Rango Frecuencial de Interés.....	44
3.6.-Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis a cargo del Instituto Geofísico del Perú.....	45
CAPÍTULO IV.....	47
RUIDO SÍSMICO.....	47
4.1.-Señales Sísmicas.....	47
4.1.1.-Calidad del Registro.....	47
4.1.2.-Umbral de Detección.....	48
4.2.-Análisis Espectral.....	49
4.2.1.-Transformada Continua de Fourier.....	49
4.2.2.-Análisis Espectral de Señales Estacionarias (Ruido).....	52
4.2.2.1.-Densidad de Potencia, Energía.....	54
4.2.2.2.-Señales Continuas.....	54
4.2.2.3.-Señales Muestreadas.....	54
4.2.2.4.-Representación de los PSD.....	56
4.3.-Modelo Global de Ruido Sísmico.....	58
4.4.-Características y Fuentes de Ruido Sísmico.....	60
4.4.1.-Ruido Instrumental.....	60
4.4.2.-Microsismos Oceánicos.....	61
4.4.3.-Ruido Sísmico de Periodo Largo.....	63
4.4.4.-Ruido Sísmico de Periodo Corto.....	65
CAPÍTULO V.....	68
METODOLOGÍA.....	68
5.1.-Generalidades.....	68
5.2.-Selección de Parámetros Temporales.....	69
5.2.1.-Análisis de Variación Diurna.....	69
5.2.2.-Análisis de Variación Estacional.....	69
5.3.-Procesamiento.....	69
5.3.1.-Formatos de Entrada.....	69
5.3.2.-Organización de la Información.....	71
5.3.3.-Pre-procesamiento.....	72
5.3.3.1.-Segmentación de la Información.....	72
5.3.3.2.-Corrección de Periodos Largos.....	73

5.3.3.3.-Aplicación de la Función Tapering.....	74
5.3.4.-Densidad Espectral de Potencia.....	76
5.3.4.1.-Transformada Discreta de Fourier.....	76
5.3.4.2.-Densidad Espectral de Potencia.....	77
5.3.4.3.-Corrección de la Respuesta Instrumental.....	78
5.3.4.4.-Representación.....	79
5.3.5.-Función Probabilidad de la Densidad.....	79
5.3.5.1.-Reducción de Componentes Frecuenciales.....	80
5.3.5.2.-Determinación de Probabilidad Espectral.....	81
5.3.5.3.-Representación de los PDF.....	82
5.4.-Interpretación de los Niveles de Ruido Sísmico.....	83
CAPÍTULO VI.....	85
RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	85
6.1.-Generalidades.....	85
6.2.-Estaciones Sísmicas de Ante-arco.....	85
6.2.1.-Estación Quilca (QLK).....	87
6.2.1.1.-Geología.....	87
6.2.1.2.-Clima.....	87
6.2.1.3.-Variación diurna del Ruido Sísmico.....	89
6.2.1.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	91
6.2.2.-Estación Huacho (HUAC).....	93
6.2.2.1.-Geología.....	93
6.2.2.2.-Clima.....	93
6.2.2.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	95
6.2.2.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	97
6.2.3.-Estación Yauca (YCA).....	99
6.2.3.1.-Geología.....	99
6.2.3.2.-Clima.....	99
6.2.3.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	101
6.2.3.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	103
6.2.4.-Estación Paracas (PAR).....	105
6.2.4.1.-Geología.....	105
6.2.4.2.-Clima.....	105
6.2.4.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	107
6.2.4.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	108
6.2.5.-Estación Mayorazgo (HUB).....	110
6.2.5.1.-Geología.....	110
6.2.5.2.-Clima.....	110
6.2.5.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	112
6.2.5.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	114
6.2.6.-Estación Quirihua (QRHC).....	116
6.2.6.1.-Geología.....	116
6.2.6.2.-Clima.....	116
6.2.6.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	118
6.2.6.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	120
6.3.-Estaciones Sísmicas de Arco Continental.....	122
6.3.1.-Estación Toquepala (TOQ).....	124

6.3.1.1.-Geología.....	124
6.3.1.2.-Clima.....	124
6.3.1.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	126
6.3.1.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	128
6.3.2.-Estación Andaray (ANDY).....	130
6.3.2.1.-Geología.....	130
6.3.2.2.-Clima.....	130
6.3.2.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	132
6.3.2.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	134
6.3.3.-Estación Huaylas (YLS).....	136
6.3.3.1.-Geología.....	136
6.3.3.2.-Clima.....	136
6.3.3.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	138
6.3.3.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	140
6.3.4.-Estación Ticapampa (TICA).....	142
6.3.4.1.-Geología.....	142
6.3.4.2.-Clima.....	142
6.3.4.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	144
6.3.4.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	146
6.3.5.-Estación Yanacancha (YANA).....	148
6.3.5.1.-Geología.....	148
6.3.5.2.-Clima.....	148
6.3.5.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	150
6.3.5.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	152
6.3.6.-Estación Santa Isabel de Chapa (ISAB).....	154
6.3.6.1.-Geología.....	154
6.3.6.2.-Clima.....	154
6.3.6.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	156
6.3.6.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	158
6.3.7.-Estación Chivay (CHVY).....	160
6.3.7.1.-Geología.....	160
6.3.7.2.-Clima.....	160
6.3.7.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	162
6.3.7.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	164
6.3.8.-Estación Alto Perú (ALTO).....	166
6.3.8.1.-Geología.....	166
6.3.8.2.-Clima.....	166
6.3.8.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	168
6.3.8.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	170
6.3.9.-Estación Ayrampuni (AYRA).....	172
6.3.9.1.-Geología.....	172
6.3.9.2.-Clima.....	172
6.3.9.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	174
6.3.9.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	176
6.3.10.-Estación Cusco (CUS).....	178
6.3.10.1.-Geología.....	178
6.3.10.2.-Clima.....	178
6.3.10.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	180

6.3.10.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	182
6.4.-Estaciones Sísmicas de Tras-arco.....	184
6.4.1.-Estación San Ignacio (SNIG).....	186
6.4.1.1.-Geología.....	186
6.4.1.2.-Clima.....	186
6.4.1.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	188
6.4.1.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	190
6.4.2.-Estación Monzon (MNZN).....	192
6.4.2.1.-Geología.....	192
6.4.2.2.-Clima.....	192
6.4.2.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	194
6.4.2.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	196
6.4.3.-Estación Satipo (STPO).....	198
6.4.3.1.-Geología.....	198
6.4.3.2.-Clima.....	198
6.4.3.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	200
6.4.3.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	202
6.4.4.-Estación Yurimaguas (YRM).....	204
6.4.4.1.-Geología.....	204
6.4.4.2.-Clima.....	204
6.4.4.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	206
6.4.4.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	208
6.4.5.-Estación Pucallpa (PUC).....	210
6.4.5.1.-Geología.....	210
6.4.5.2.-Clima.....	210
6.4.5.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	212
6.4.5.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	214
6.4.6.-Estación Iquitos (IQT).....	216
6.4.6.1.-Geología.....	216
6.4.6.2.-Clima.....	216
6.4.6.3.-Variación Diurna del Ruido Sísmico.....	218
6.4.6.4.-Variación Estacional del Ruido Sísmico.....	220
CONCLUSIONES.....	222
BIBLIOGRAFÍA.....	224

Índice de Figuras

Figura 1.1: Distribución Espacial de las Estaciones Sísmicas de la REDSSAT.....	17
Figura 2.1: Transductor Electromagnético de Fuerza (Wielandt, 2011).....	20
Figura 2.2: Circuito de retroalimentación de un acelerómetro fuerza-balance (FBA) (Wielandt, 2011).....	21
Figura 2.3: Circuito de un sismómetro VBB (Wielandt, 2011).....	22
Figura 2.4: Modelo físico de un sismómetro inercial.....	23
Figura 2.5: Curvas de respuesta de un sismómetro electromagnético con respecto a diferentes señales de entrada (desplazamiento, velocidad y aceleración).....	25
Figura 2.6: Archivo 'polezero' de una estación de banda ancha.....	27
Figura 2.7: Rango Dinámico del sensor sísmico Trillium 120P.....	29
Figura 2.8: Sismómetro Trillium Compact.....	30
Figura 2.9: Orientación de los ejes del Sismómetro Trillium Compact.....	31
Figura 2.10: Ruido Propio del Sismómetro Trillium Compact.....	34
Figura 2.11: Trillium Compact, rango dinámico. Líneas Azules eventos locales (<10 km). Líneas verdes, eventos regionales (>10 km). Líneas Naranjas (>3000 km).....	35
Figura 2.12: Diagrama de Bode para sismómetros Trillium Compact. Línea Roja, respuesta del terreno. Línea verde, señal de entrada de la calibración. Línea Azul, respuesta de la calibración.....	36
Figura 3.1: Registro sísmicos de tres estaciones y método gráfico para localización de epicentros.	38
Figura 3.2: Geometría de red para estaciones alineadas, con y sin determinación azimutal (izquierda y derecha respectivamente).....	40
Figura 3.3: Representación de los Niveles de Ruido Sísmico.....	43
Figura 3.4: Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis.....	46
Figura 4.1: a) Traza sísmica con altos niveles de ruido de fondo. b) la misma traza sísmica sin el ruido de fondo.....	48
Figura 4.2: a) Amplitudes de arribos de ondas sísmicas a distancias locales y ruido de la componente vertical según los modelos de Peterson (1993) (Líneas negras). Las zonas sombreadas representan los rangos dinámicos de diferentes redes sísmicas. b) lo mismo que en a) para amplitudes de arribos a distancias regionales.....	49
Figura 4.3: $f(t)$, la señal en el dominio del tiempo (a la izquierda) puede ser descompuesta en el dominio de la frecuencia por su Espectro Complejo de Fourier. La amplitud (medio) y la fase (derecha) ambas son necesarias para recrear la señal en el tiempo (Lay y Wallace, 1995).....	51
Figura 4.4: Una señal (derecha) esta formada por la suma de sus términos armónicos. Las amplitudes de cada término armónico varía, siendo definidas por el espectro de amplitud. El cambio de fase de cada componente armónica esta definido por el espectro de fase.....	52
Figura 4.5: En cada registro se superponen tres señales diferentes con un mismo espectro de amplitud, pero con diferente espectro de fase. Los picos amplitudinales son proporcionales al ancho de banda. Cuando el ancho de banda se reduce, la señal del pulso se hace más ancha, el ruido más suave y el barrido más corto.....	53
Figura 4.6: PSD de la aceleración, de la velocidad (línea azul) y del desplazamiento (línea roja). Las unidades para y son con respecto a y respectivamente.....	56
Figura 4.7: PDF para la evaluación de los ruidos de fondo para la estación AHID (McNamara y Buland, 2004).....	57
Figura 4.8: Compilación de los espectros de densidad según Peterson (1993). NHMN corresponde	

al nivel de ruido máximo y NLMN al nivel de ruido mínimo.....	58
Figura 4.9: Modelo de ruido obtenido para las estaciones de la red GSN, usando solo la componente vertical de 118 estaciones (Berger y Davis, 2004).....	59
Figura 4.10: Clasificación de olas oceánicas según su periodo (Munk, 1950).....	62
Figura 4.11: Esquema de la generación de microsismos primarios y secundarios. L-area de baja presión, X-area de interferencia donde se desarrollan las ondas estacionarias. (Fiedrich et al., 1998).....	63
Figura 4.12: Corrección por efectos atmosféricos (Beaudin et al., 1996).....	64
Figura 4.13: Ruido sísmico para las 3 componentes de una estación. La imagen muestra la mayor cantidad de ruido presente en las componentes horizontales.....	65
Figura 4.14: Variación diaria del ruido sísmico (Stutzmann et al., 2000).....	66
Figura 4.15: Espectrograma del ruido de la componente vertical. Para los periodos de 10 a 10 ⁻¹ s se ve que los niveles de ruido más bajos se dan en días Sábado y Domingo y los más altos para los días de semana. (Lehujeur et al., 2015).....	66
Figura 5.1: Diagrama de Flujo de la Metodología Aplicada.....	68
Figura 5.2: RESPFILE, componente BHE de la estación ANDY.....	71
Figura 5.3: Organización de la información.....	72
Figura 5.4: Segmentación de trazas sísmicas, con traslape de 75%.....	72
Figura 5.5: Rango frecuencial de interés.....	73
Figura 5.6: Manchado espectral a causa de la Transformación Rápida de Fourier y aplicación de función Tapering.....	75
Figura 5.7: Respuesta instrumental de la estación ALTO, componente BHE. Arriba, con respecto a la velocidad. Abajo, con respecto a la aceleración.....	79
Figura 5.8: Representación de los intervalos en 1/8 de octava. a) con escala decimal. b) con escala logarítmica.....	80
Figura 5.9: Función probabilidad de la densidad, para la estación Quilca (QLK) correspondiente al día 21/12/2015.....	83
Figura 6.1: Distribución Espacial de Estaciones Sísmicas de Ante-arco de la REDSSAT.....	86
Figura 6.2: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica QLK.....	88
Figura 6.3: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación QLK.....	90
Figura 6.4: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación QLK.....	90
Figura 6.5: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación QLK.....	91
Figura 6.6: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación QLK. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre). A la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	92
Figura 6.7: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica HUAC.....	94
Figura 6.8: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación HUAC.....	96
Figura 6.9: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación HUAC.....	96
Figura 6.10: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación HUAC.....	97
Figura 6.11: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación HUAC. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	98
Figura 6.12: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica YCA.....	100
Figura 6.13: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación YCA.....	102
Figura 6.14: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación YCA.....	102
Figura 6.15: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación YCA.....	103

Figura 6.16: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación YCA. A la izquierda los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al final del verano (5 de marzo). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	104
Figura 6.17: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica PAR.....	106
Figura 6.18: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación PAR.....	108
Figura 6.19: Variación Estacional del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación PAR. A la izquierda los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al final del verano (22 de junio).....	109
Figura 6.20: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica HUB.....	111
Figura 6.21: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación HUB.....	113
Figura 6.22: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación HUB.....	113
Figura 6.23: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación HUB.....	114
Figura 6.24: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación HUB. A la izquierda los PDFs correspondientes al inicio de la primavera (21 de setiembre) y a la derecha los correspondientes al inicio del invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	115
Figura 6.25: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica QRHC.....	117
Figura 6.26: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación QRHC.....	119
Figura 6.27: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación QRHC....	119
Figura 6.28: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación QRHC.....	120
Figura 6.29: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación QRHC. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	121
Figura 6.30: Distribución Espacial de Estaciones Sísmicas de Arco Continental de la REDSSAT.	123
Figura 6.31: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica TOQ.....	125
Figura 6.32 Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación TOQ.....	127
Figura 6.33: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación TOQ.....	127
Figura 6.34: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación TOQ.....	128
Figura 6.35 Variación Estacional del ruido sísmico en la estación TOQ. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 junio). En orden descendientes son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	129
Figura 6.36: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica ANDY.....	131
Figura 6.37: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación ANDY....	133
Figura 6.38: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación ANDY...	133
Figura 6.39: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación ANDY....	134
Figura 6.40: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación ANDY. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	135
Figura 6.41: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica YLS.....	137
Figura 6.42: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación YLS.....	139
Figura 6.43: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación YLS.....	139
Figura 6.44: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación YLS.....	140
Figura 6.45: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación YLS. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes	

al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).....	141
Figura 6.46: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica TICA.....	143
Figura 6.47: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación TICA.....	145
Figura 6.48: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación TICA.....	145
Figura 6.49: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación TICA.....	146
Figura 6.50: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación TICA. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	147
Figura 6.51: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica YANA.....	149
Figura 6.52: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación YANA.....	151
Figura 6.53: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación YANA....	151
Figura 6.54: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación YANA.....	152
Figura 6.55: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación YANA. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	153
Figura 6.56: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica ISAB.....	155
Figura 6.57: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación ISAB.....	157
Figura 6.58: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación ISAB.....	157
Figura 6.59: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación ISAB.....	158
Figura 6.60: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación ISAB. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	159
Figura 6.61: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica CHVY.....	161
Figura 6.62: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación CHVY.....	163
Figura 6.63: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación CHVY....	163
Figura 6.64: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación CHVY.....	164
Figura 6.65: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación CHVY. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	165
Figura 6.66: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica ALTO.....	167
Figura 6.67: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación ALTO.....	169
Figura 6.68: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación ALTO.....	169
Figura 6.69: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación ALTO.....	170
Figura 6.70: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación ALTO. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	171
Figura 6.71: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica AYRA.....	173
Figura 6.72: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación AYRA.....	175
Figura 6.73: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación AYRA....	175
Figura 6.74: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación AYRA.....	176
Figura 6.75: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación AYRA. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes	

al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	177
Figura 6.76: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica CUS.....	179
Figura 6.77: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación CUS.....	181
Figura 6.78: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación CUS.....	181
Figura 6.79: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación CUS.....	182
Figura 6.80: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación CUS. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	183
Figura 6.81: Distribución Espacial de Estaciones Sísmicas de Tras-arco de la REDSSAT.....	185
Figura 6.82: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica SNIG.....	187
Figura 6.83: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación SNIG.....	189
Figura 6.84: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación SNIG.....	189
Figura 6.85: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación SNIG.....	190
Figura 6.86: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación SNIG. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	191
Figura 6.87: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica MNZN.....	193
Figura 6.88: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación MNZN....	195
Figura 6.89: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación MNZN..	195
Figura 6.90: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación MNZN....	196
Figura 6.91: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación MNZN. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	197
Figura 6.92: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica STPO.....	199
Figura 6.93: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación STPO.....	201
Figura 6.94: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación STPO.....	201
Figura 6.95: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación STPO.....	202
Figura 6.96: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación STPO. A la izquierda los PDFs correspondientes a inicios del invierno (22 de junio) y a la derecha los PDFs correspondientes a mediados del invierno (14 de agosto). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	203
Figura 6.97: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica YRM.....	205
Figura 6.98: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación YRM.....	207
Figura 6.99: Variación Diurna del ruido sísmico de la componente BHN de la estación YRM.....	207
Figura 6.100: Variación Diurna del ruido sísmico de la componente BHZ de la estación YRM.....	208
Figura 6.101: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación YRM. A la izquierda los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (11 de agosto). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	209
Figura 6.102: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica PUC.....	211
Figura 6.103: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación PUC.....	213
Figura 6.104: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación PUC.....	213
Figura 6.105: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación PUC.....	214
Figura 6.106: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación PUC. A la izquierda los PDFs	

<p>correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (17 de agosto). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....</p>	215
Figura 6.107: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica IQT.....	217
Figura 6.108: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación IQT.....	219
Figura 6.109: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación IQT.....	219
Figura 6.110: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación IQT.....	220
Figura 6.111: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación IQT. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.....	221

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Tecnología.....	31
Tabla 2.2: Performance.....	31
Tabla 2.3: Interfase.....	32
Tabla 2.4: Energía.....	32
Tabla 2.5: Características Físicas.....	33
Tabla 2.6: Características Ambientales.....	33
Tabla 4.1: Densidad Espectral Máxima de la Potencia del ruido, para periodos determinados, con respecto a la aceleración, velocidad, desplazamiento (Peterson, 1993).....	58
Tabla 4.2: Densidad Espectral Mínima de la Potencia del ruido, para periodos determinados, con respecto a la aceleración, velocidad, desplazamiento (Peterson, 1993).....	59
Tabla 4.3 Recomendaciones mínimas para la instalación de una estación sísmica. (Wilmore, 1979)	67
Tabla 5.1: Pares f-k para $ntff=16384$, $fs=50$ mps.....	77
Tabla 5.2: Intervalos discretizados finales.....	81
Tabla 5.3: Información necesaria para la generación de PDFs.....	82
Tabla 6.1: Estaciones de Ante-arco.....	85
Tabla 6.2: Estaciones de Arco Continental.....	122
Tabla 6.3: Estaciones de Tras-arco.....	184

RESUMEN

La 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 (REDSSAT-IGP) fue realizada con el fin de determinar la calidad de información que es registrada en cada una de la estaciones. Para definir si estos niveles son aceptables o no, se analizan las características frecuenciales de los registros utilizando la función probabilidad de densidad espectral de potencia (PDF) con respecto a la aceleración del terreno. Estos resultados son comparados con los estándares mundiales que han sido establecidos en diferentes redes sísmicas del mundo. Así mismo, la distribución frecuencial del ruido es relacionada con sus fuentes generadoras para proponer medidas que ayuden a reducir los niveles de ruido en el caso que excedan los estándares mundiales.

Los resultados han mostrado que la mayoría de estaciones sísmicas de banda ancha de la REDSSAT-IGP presentan niveles de ruido sísmico dentro de los límites máximos establecidos. Entre ellas, las estaciones QLK y CUS son las que presentan menores niveles de ruido sísmico, y las estaciones IQT, PUC y YRM los niveles mayores para frecuencias altas, sobre todo en horas del día.

Estas variaciones están asociados a la litología del lugar, características geográficas, variables climatológicas y distribución demográfica.

ABSTRACT

Seismic noise levels at the “Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis a Cargo del Instituto Geofísico del Perú” (REDSSAT-IGP) were evaluated with the purpose of determining the data quality that is recorded at each one of the stations. To find out whether these levels are acceptable or not, the frequency characteristics of the records are analyzed by obtaining their probability density function (PDF) of the power spectrum with respect to acceleration. The results are then compared with global standards that have been established for different seismic networks around the world. Likewise, the frequency distribution of the seismic noise is related to the different generating sources so that measures can be taken to attempt to reduce these levels in the cases where they exceed the global standard.

Results have shown that most of the broadband seismic stations of the REDSSAT-IGP present seismic noise levels that lie beneath the maximum limits. Among them, QLK and CUS are the less noisy stations. On the other hand, IQT, PUC and YRM recorded the highest levels of high-frequency seismic noise, specially during daytime.

These variations are associated to the site lithology, geographic characteristics, climatological variables and demographic distribution.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis a cargo del Instituto Geofísico del Perú (REDSSAT-IGP), es un sistema integrado de sismómetros con transmisión satelital. Su objetivo es monitorear constantemente la actividad sísmica que pueda afectar el territorio nacional, de manera que se pueda dar alertas rápidas y eficaces ante la posible ocurrencia de tsunamis.

Al momento de la instalación de una red sísmica como la REDSSAT-IGP, se debe considerar una geometría adecuada, con estaciones instaladas en ambientes geológicos adecuados para el registro de datos sísmicos (e.g. basamento rocoso, suelo competente). De esta manera, la red proveerá información de calidad; es decir, señales sísmicas con una relación señal-ruido, de manera que los sismólogos puedan realizar observaciones precisas a fin de realizar estudios que aporten mejor conocimiento.

En estas condiciones, las estaciones serían instaladas en zonas alejadas de la población, donde los aspectos de seguridad y mantenimiento del equipo tienen implicancias económicas, que sumadas a los elevados costos del instrumental, resultan en un esfuerzo difícil de alcanzar. Por esto, se tienen que sacrificar condiciones geológicas y geográficas ideales para buscar el equilibrio entre costos y beneficios, aunque se reduzca la calidad en señal sísmica.

En general, la información óptima que una estación sísmica ofrece dependerá de la relación entre la señal y el ruido, esperando que sea lo suficientemente alta para asegurar la calidad de la información. Entonces, es necesario realizar el análisis de los niveles de ruido sísmico presente en cada una de las estaciones, esperando sean aceptables con respecto a los estándares mundiales. En el caso contrario, se busca determinar medidas que ayuden a mejorar la relación señal-ruido.

La caracterización del ruido sísmico se realiza calculando la distribución de las componentes frecuenciales que forman la señal, y para ello se hace uso como herramienta la curva de la densidad espectral de potencia de la aceleración del terreno. Con las curvas obtenidas se define si el ruido sísmico presente en la estación se encuentra dentro de los límites máximos y mínimos establecidos por Peterson (1993); además, se caracteriza, en el dominio frecuencial, las fuentes de ruido sísmico, en función de sus parámetros temporales (hora del día y/o época del año), espaciales (geográficos, geológicos, climatológicos y demográficos) y de diseño de la estación sísmica (profundidad, tipo de suelo).

Esta investigación se divide en 6 capítulos ordenados de acuerdo al enfoque de los objetivos. El Capítulo I: Introducción, presenta la introducción, el problema y los objetivos de la investigación. El Capítulo II: Instrumental Sísmico, detalla los aspectos básicos de los sensores sísmicos utilizados en la REDSSAT-IGP. El Capítulo III: Redes Sísmica, detalla los criterios necesarios para asegurar la correcta instalación y funcionamiento de una red sísmica. El Capítulo IV: Ruido Sísmico, detalla los criterios físico-matemáticos necesarios para realizar la evaluación y caracterización frecuencial del ruido sísmico. El Capítulo V: Metodología, describe el procedimiento seguido en el presente estudio para la obtención de los resultados. El Capítulo VI: Resultados e Interpretación, presenta los resultados y la interpretación de los niveles de ruido sísmico en cada estación sísmica de la REDSSAT-IGP. Finalmente, se presenta las conclusiones a las que se llegaron con el presente trabajo de investigación.

1.2 Área de Estudio

La evaluación del ruido sísmico se realizará para las estaciones sísmicas de banda ancha que integran la REDSSAT-IGP, las cuales se encuentra distribuidas a lo largo de todo el territorio nacional (ver Figura 1.1). El análisis espacial de las fuentes será tanto de carácter regional (envolviendo todo el país), como de carácter local, desarrollando un análisis geológico, geográfico, climatológico y demográfico a 25 km en el entorno de la estación.

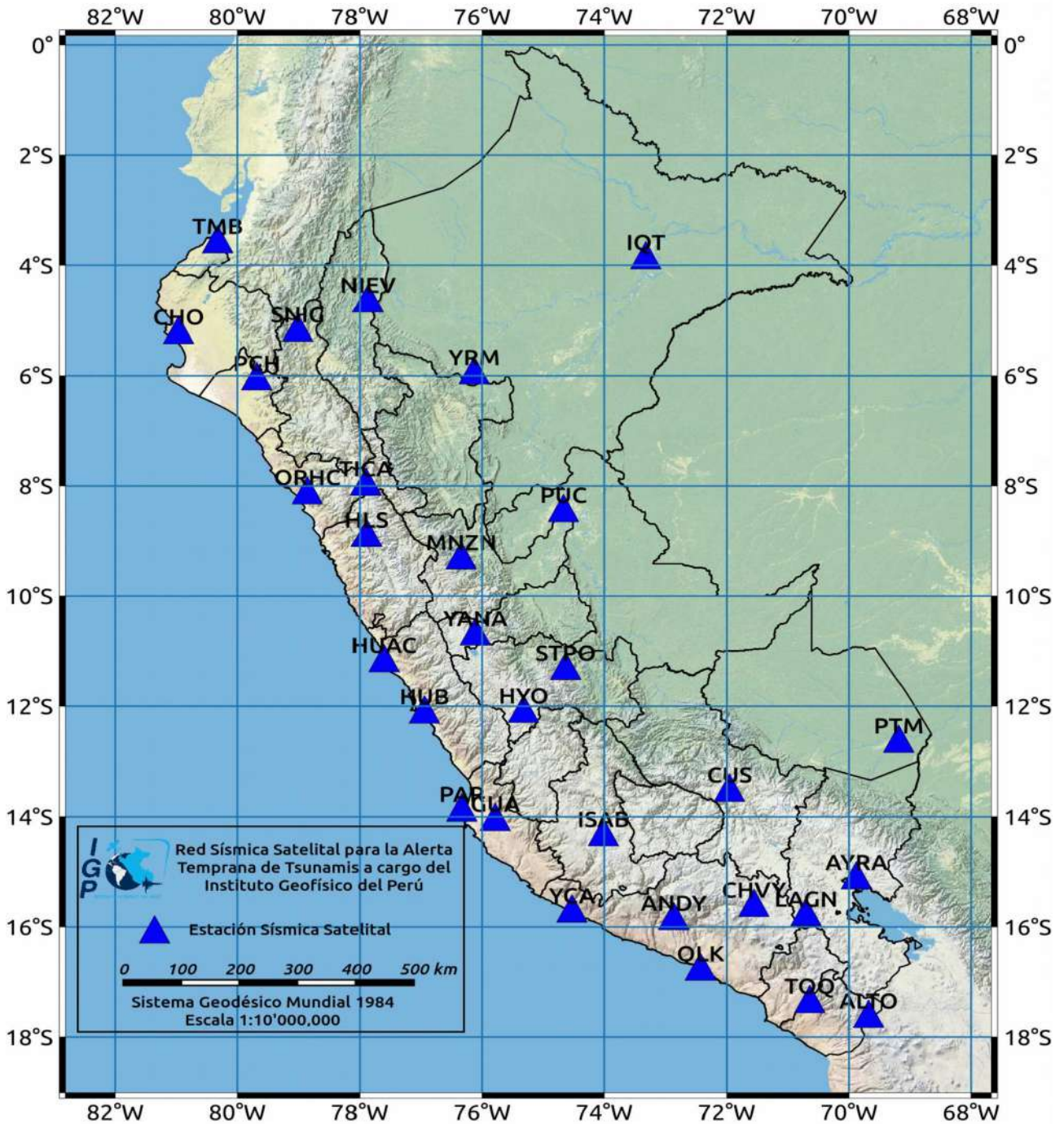


Figura 1.1: Distribución Espacial de las Estaciones Sísmicas de la REDSSAT.

1.3 Problema de la Investigación

Al momento de la implementación de una estación sísmica se procura buscar ubicaciones estratégicas, considerando básicamente la baja presencia de ruido de fondo. Estos lugares, por lo general, están ubicados en zonas alejadas de la población, donde los aspectos de seguridad y mantenimiento del equipo tienen implicancias económicas, que sumadas a los elevados costos del instrumental resultan en un esfuerzo difícil de alcanzar. Por esto, se tiene que sacrificar condiciones geológicas y geográficas ideales para buscar el equilibrio entre costos y beneficios, aunque se disminuya la calidad en la señal sísmica.

La información óptima que una estación sísmica ofrezca, dependerá de la relación entre la señal y el ruido, esperando que sea lo suficientemente alta, a fin de obtener registros de calidad.

Por lo expuesto anteriormente, es necesario evaluar el ruido sísmico presente en cada una de las estaciones de la Red Sísmica Satelital para Alerta Temprana de Tsunamis a cargo del Instituto Geofísico del Perú.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos Generales

- Evaluar los niveles de ruido sísmico presente en cada una de las estaciones que integran la Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis a cargo del Instituto Geofísico del Perú.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Obtener la distribución frecuencial del ruido sísmico en cada estación sísmica
- Caracterizar frecuencialmente el ruido sísmico de cada estación que integra la Red Sísmica Satelital según su ubicación temporal y espacial.
- Comparar espacial y temporalmente los niveles de ruido sísmico.

1.5 Justificación

La investigación se justifica por la necesidad de un control de calidad en la señal proveniente de las estaciones sísmicas que conforman la Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis.

1.6 Hipótesis de la Investigación

Se determinará que los niveles de ruido sísmico de cada estación se encuentran dentro de los límites establecidos por Peterson (1993). Además, se definirá si la distribución frecuencial del ruido sísmico depende de las variables espaciales (geografía, geología, clima y/o demografía) y/o de las variables temporales (hora del día y/o época del año).

CAPÍTULO II INSTRUMENTAL SÍSMICO

2.1 Generalidades

Cuando un sismómetro convencional (pasivo) es acelerado, la inercia de la masa hace que se mueva con respecto al plano de referencia. Así, el desplazamiento o velocidad relativa es convertida en una señal eléctrica; sin embargo, este principio solo se ha mantenido para sismómetros de periodo corto; mientras que, los sismómetros de banda ancha modernos (activos) se rigen, por lo general, de acuerdo al principio de fuerza-balance.

2.1.1 Principio Fuerza-Balance

Este principio consiste en hacer que la fuerza inercial sea compensada (balanceada) por una fuerza generada eléctricamente, de modo que la masa siempre se mantenga estable con respecto al plano de referencia, . No obstante, siempre se debe presentar un movimiento relativo mínimo, caso contrario, la fuerza inercial no podría ser detectada.

En general, esta fuerza compensadora es generada con un transductor de fuerza electromagnética (Figura 2.1), en el cual una bobina se mueve en el campo magnético de un imán permanente a medida que circula corriente a través de ella. Este movimiento produce una fuerza, de acuerdo a la Ley de Lenz, la cual establece que una corriente eléctrica, inducida por un campo magnético cambiante, fluirá de una manera tal que creará su propio campo magnético el cual será opuesto al campo magnético que lo creó. Este efecto es usado para amortiguar la oscilación libre mecánica que presentan los sensores sísmicos pasivos.

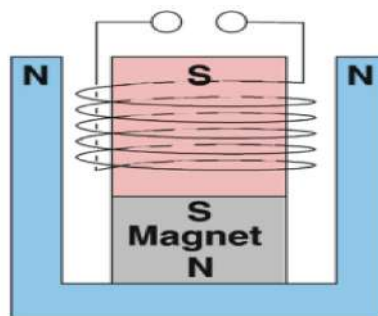


Figura 2.1: Transductor Electromagnético de Fuerza (Wielandt, 2011).

El circuito electrónico mostrado en la Figura 2.2 ajusta con una fuerza compensadora la masa, haciendo que siga el movimiento del plano de referencia, siendo más efectivo cuando incluye un integrador en el cual el desfase de la masa es anulado en el tiempo. Debido a la inevitable demora del circuito de retroalimentación, los sistemas de fuerza-balance tienen un ancho de banda limitado; sin embargo, en la banda frecuencial donde si son efectivos, ellos generan una fuerza compensadora que es proporcional a la aceleración del terreno. Cuando la fuerza es proporcional a la corriente en el transductor, entonces el voltaje a través de la resistencia R , y el voltaje de salida son proporcionales a la aceleración del terreno. Consecuentemente, la aceleración es convertida en una señal eléctrica sin depender de la precisión de la suspensión mecánica.

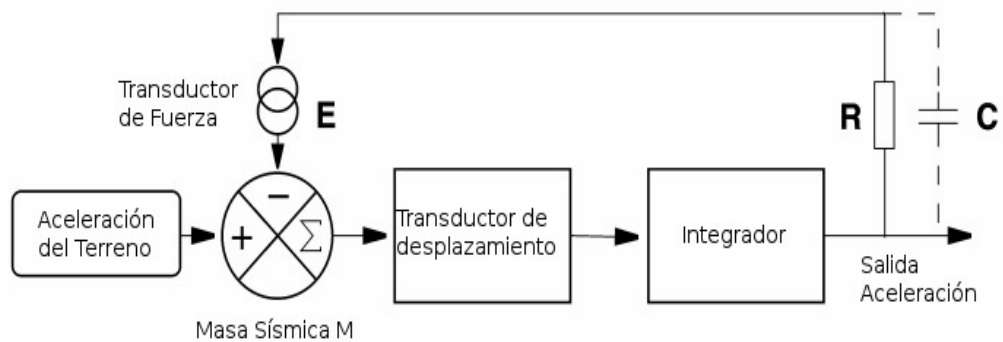


Figura 2.2: Circuito de retroalimentación de un acelerómetro fuerza-balance (FBA) (Wielandt, 2011).

Por otro lado, el circuito de la Figura 2.2, sin el capacitador C , representa el circuito de un acelerómetro usado para el registros de movimientos fuertes del terreno. Sumando la fuerza inercial y la electromagnética, se puede llegar a la *responsividad* (el voltaje de salida por aceleración de terreno) definida en la Ec. (2.1).

$$U_{out}/\ddot{x} = MR/E \quad (2.1)$$

Donde M es la masa, R la resistencia total del circuito, y E la responsividad del transductor de fuerza (en N/A). La conversión es determinada por solo tres componentes pasivas, y de ellos, la masa es exacta (libre de error), el resistor es una componente ideal, y el transductor de fuerza es muy preciso ya que los

movimientos son pequeños. Algunos acelerómetros no tienen el resistor incluido en el circuito, lo que permite a los usuarios elegir el que les convenga y así tener la ganancia deseada.

2.1.2 Sismómetros de banda ancha

Un sismómetro de banda ancha moderno, por lo general; registra en términos de voltaje los movimientos del terreno en el rango frecuencial de $50-0.01 \text{ Hz}$.

Para que estos registros sean de alta sensibilidad, no es conveniente una señal de salida que sea proporcional a la aceleración del terreno, ya que para frecuencias altas, los acelerómetros son fácilmente saturados por ruido del tráfico o por perturbancias impulsivas. Lo que se necesita es una respuesta pasa-banda en términos de aceleración, o equivalentemente una respuesta pasa-alta en términos de velocidad del terreno.

Entonces, para obtener la respuesta en términos de velocidad del terreno, se tendría que añadir al circuito de la Figura 2.2 componentes que hagan las veces de integradores y diferenciadores. En la Figura 2.3, el capacitador C añadido funciona como un integrador de la señal de corriente en el tiempo.

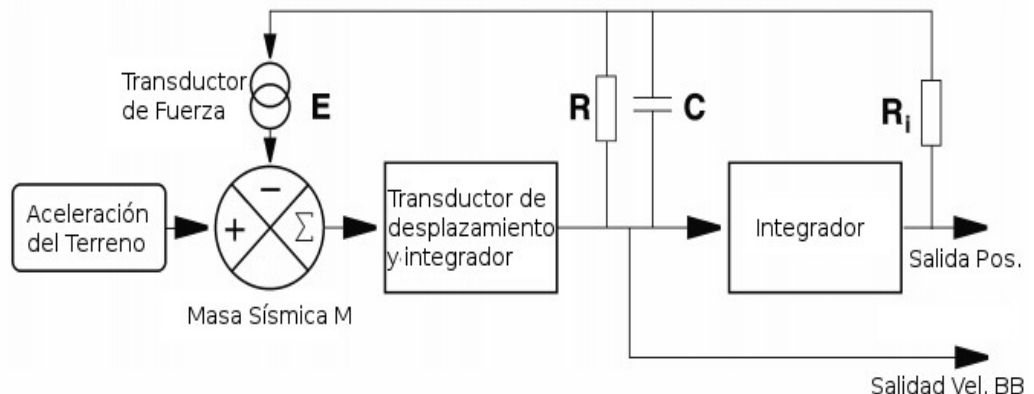


Figura 2.3: Circuito de un sismómetro VBB (Wielandt, 2011).

El voltaje que pase a través de C es proporcional a la velocidad del terreno y sirve como la señal de salida de sismómetro. El voltaje resultante por velocidad de terreno, i.e. la aparente constante del generador de la retroalimentación del sismómetro, es:

$$E_{app} = V_{out} / \dot{x} = M / EC \quad (2.2)$$

Adicionalmente, un segundo integrador es añadido para representar la posición del sensor. Este último no indica la posición directamente, ya que no hay desplazamiento, lo que indica es donde estaría si el sistema de compensación estuviera desactivado. La salida de la posición de la masa no es normalmente usada para los registros sísmicos, pero es útil para un diagnóstico del estado de funcionamiento, y es usado en algunos procedimientos de instalación.

2.1.3 Modelo Físico de un Sismómetro

Sea sismómetro mecánico o electromagnético, uno del tipo inercial puede ser explicado por el modelo físico propuesto en la Figura 2.4. Y en donde, la fuerza que actúa sobre la masa M puede ser definida como:

$$F_y = M \ddot{y}(t) = f(t) - Sz(t) - D\dot{z}(t) \quad (2.3)$$

Donde M , es la masa en kg , S es la constante de rigidez en N/m y D la constante de fricción viscosa en $N*s/m$ (ver Figura 2.4).

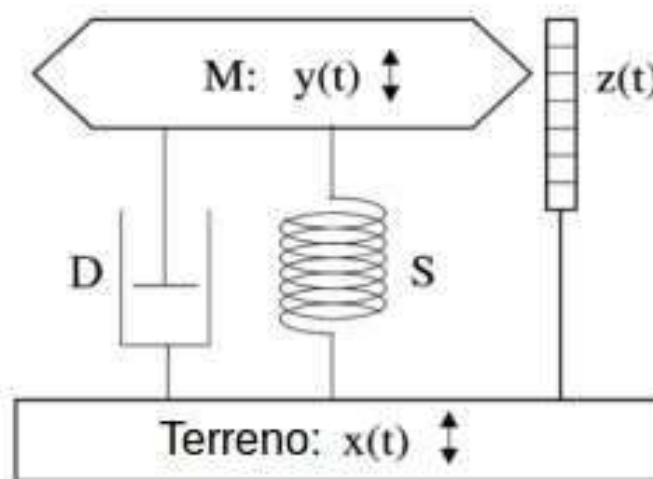


Figura 2.4: Modelo físico de un sismómetro inercial.

En este sistema, es de interés es el movimiento con respecto al terreno $z(t)$, el mismo que es definido en la Ec. (2.3) como:

$$M\ddot{z}(t) + D\dot{z}(t) + Sz(t) = f(t) - M\ddot{x}(t) \quad (2.4)$$

Aplicando la transformada de LaPlace, la ecuación diferencial (2.4) puede ser expresada de la siguiente manera:

$$(M\alpha^2 + D\alpha + S)\tilde{Z} = \tilde{F} - \alpha^2 M\tilde{X} \quad (2.5)$$

Por otro lado, la velocidad angular natural del sismómetro es definido como $\omega_0 = \sqrt{S/M}$ y el damping numérico como $h = D/2\omega_0 M$. Entonces, el movimiento de la masa relativo al terreno (\tilde{Z}) queda definido como:

$$\tilde{Z} = \frac{\tilde{F}/M + \omega^2 \tilde{X}}{-\omega^2 + 2j\omega\omega_0 h + \omega_0^2} \quad (2.6)$$

Donde, \tilde{F} es la fuerza que causa el movimiento y \tilde{X} es el movimiento del terreno.

2.1.4 Función Respuesta

Para convertir el movimiento de la masa (aparente) en señal eléctrica, se toma el voltaje denotado por \tilde{U} . Considerando la responsividad del transductor como E (Volteos por metro por segundo; $\tilde{U} = -j\omega E\tilde{Z}$) se obtiene:

$$\tilde{U} = -j\omega E \frac{\tilde{F}/M + \omega^2 \tilde{X}}{(-\omega^2 + 2j\omega\omega_0 h + \omega_0^2)} \quad (2.7)$$

Para lo cual, en la ausencia de una fuerza externa ($f(t)=0$, $\tilde{F}=0$), se obtiene las funciones complejas de respuesta. Para el desplazamiento:

$$\tilde{H}_d(\omega) := \frac{\tilde{U}}{\tilde{X}} = \frac{-j\omega^3 E}{-\omega^2 + 2j\omega\omega_0 h + \omega_0^2} \quad (2.8)$$

Para la velocidad:

$$\tilde{H}_v(\omega) := \frac{\tilde{U}}{j\omega\tilde{X}} = \frac{-\omega^2 E}{-\omega^2 + 2j\omega\omega_0 h + \omega_0^2} \quad (2.9)$$

Y para la aceleración:

$$\tilde{H}_a(\omega) := \frac{\tilde{U}}{-\omega^2 \tilde{X}} = \frac{j\omega E}{-\omega^2 + 2j\omega\omega_0 h + \omega_0^2} \quad (2.10)$$

Con respecto a su respuesta frecuencial, los sismómetros electromagnéticos sufren un filtro pasa-alta de segundo orden para la velocidad, y pasa-banda para la aceleración. Finalmente, su respuesta ante el desplazamiento no es plana en ninguna banda (Figura 2.5).

Respuesta de Sismómetro Electromagnético

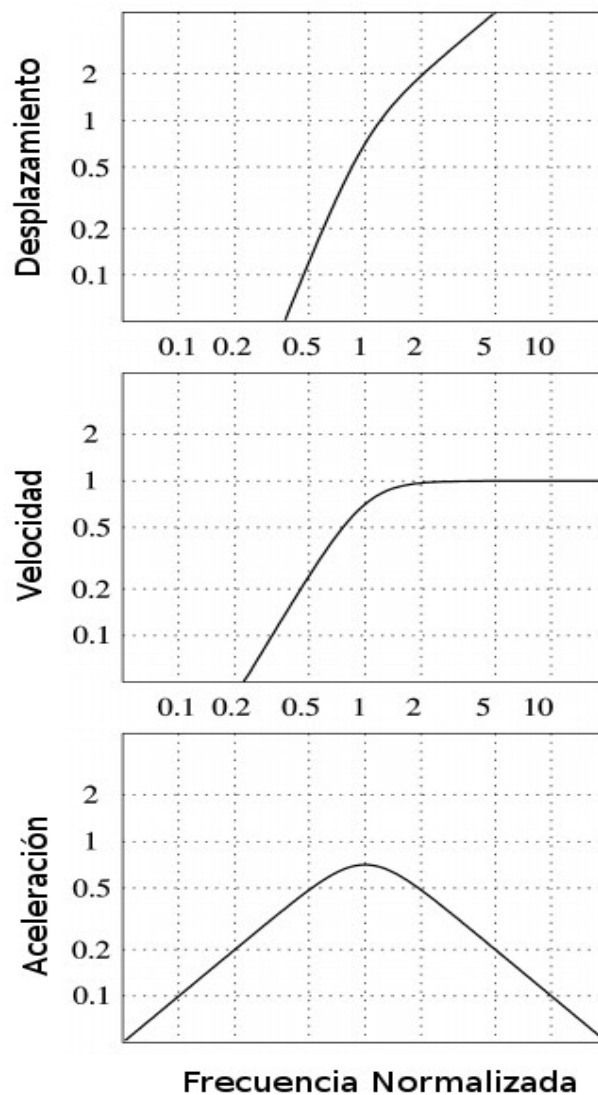


Figura 2.5: Curvas de respuesta de un sismómetro electromagnético con respecto a diferentes señales de entrada (desplazamiento, velocidad y aceleración).

2.1.5 Función Transferencia

La función de transferencia compleja es una función racional de la frecuencia, la misma que puede ser definida de diversas maneras:

- Por sus frecuencias de esquina (máxima y mínima) y la constante de damping
- Por sus coeficientes polinomiales
- Por sus polos y ceros

En general, la Función Transferencia es expresada en polos y ceros, además de una constante de acuerdo a la Ec. (2.9). Esta Función Transferencia permite que a partir de una función racional (e.g. Ec. (2.8)), se factorizen los polinomios del numerador y denominador (e.g. Ec. (2.11)) según los términos z_i y p_i de la Ec. (2.12) (Hardt, 2004).

$$H(s) = \frac{b_m s + b_{(m-1)} s^{(m-1)} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{(n-1)} s^{(n-1)} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.11)$$

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = K \frac{(s-z_1)(s-z_2)\dots(s-z_{m-1})(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_{n-1})(s-p_n)} \quad (2.12)$$

Donde los z_i 's son las raíces de la Ec. (2.13), definidos como los ceros del sistema.

$$N(s) = 0 \quad (2.13)$$

y los p_i 's son las raíces de la Ec. (2.14) definidos como los polos del sistema.

$$D(s) = 0 \quad (2.14)$$

Ahora, los valores de los polos y ceros pueden ser reales como imaginarios, y para el primer caso serian de la forma:

$$p_i = \sigma_1 \quad (2.15)$$

0 de la forma siguiente, en caso de ser complejos:

$$p_1 = \sigma_i + j\omega_i \quad (2.16)$$

Los archivos 'polezero' (Figura 2.6) presentan en la primera columna los valores de σ_i y la segunda los valores de ω_i .

De la Ec. (2.12) queda fuera de esta representación la constante K, la cual se define al final del archivo mostrado en la Figura 2.6 bajo el nombre de 'constant'. Esta constante es determinada por el producto de la Sensitividad y el Factor de Normalización A0 (Ec. (2.17)).

$$\text{Constante} = \text{Sensitividad} \times \text{Factor de Normalización} \quad (2.17)$$

```

* NETWORK      (KNETWK): IU
* STATION      (KSTNM): COLA
* LOCATION     (KHOLE): 00
* CHANNEL      (KCMPNM): BH1
* CREATED      : 2016-03-09T20:28:13
* START        : 2009-07-09T00:00:00
* END          : 2011-01-26T21:26:00
* DESCRIPTION   : College Outpost, Alaska, USA
* LATITUDE     : 64.873599
* LONGITUDE    : -147.861600
* ELEVATION    : 80.0
* DEPTH        : 120.0
* DIP          : 90.0
* AZIMUTH      : 111.0
* SAMPLE RATE  : 20.0
* INPUT UNIT   : M
* OUTPUT UNIT  : COUNTS
* INSTTYPE     : Geotech KS-54000 Borehole Seismometer
* INSTGAIN     : 1.918030e+03 (M/S)
* COMMENT      :
* SENSITIVITY  : 3.217920e+09 (M/S)
* A0           : 8.623500e+04
* *****
ZEROS  3
      +0.000000e+00  +0.000000e+00
      +0.000000e+00  +0.000000e+00
      +0.000000e+00  +0.000000e+00
POLES  5
      -5.943130e+01  +0.000000e+00
      -2.271210e+01  +2.710650e+01
      -2.271210e+01  -2.710650e+01
      -4.800400e-03  +0.000000e+00
      -7.372560e-02  +0.000000e+00
CONSTANT      2.774973e+14

```

Figura 2.6: Archivo 'polezero' de una estación de banda ancha.

2.2 Parámetros del Sensor

En el mercado existen una amplia gama de sensores, con diferentes especificaciones y precios, por lo que resulta un poco complicado dar con la mejor alternativa. En general, la elección dependerá de la banda frecuencial de interés; sin embargo, hay muchos otros parámetros que describen al sensor, los cuales tienen que ser considerados de la misma manera. A continuación se describe los más importante.

2.2.1 Respuesta frecuencial

La mayoría de los sensores tienen una respuesta en velocidad o aceleración plana dentro de una determinada banda frecuencial. Sin embargo, es importante estar consciente de que el rango dinámico o la sensibilidad depende de la frecuencia, de manera que un sensor puede tener mejores especificaciones en una banda más angosta. Por ejemplo, un acelerómetro X tiene un rango dinámico de 135 dB desde 0.01 hasta 50 Hz y de 145 dB desde 0.01 hasta 20 Hz. Lo que implica una presencia mayor de ruido para frecuencias mayores a 20 Hz (Havskov y Alguacil, 2002).

2.2.2 Sensitividad

Por lo general, la sensibilidad esta dada como la ganancia del instrumento (e.g. $1000V/ms^{-1}$). Sin embargo, este número no dice mucho acerca de la señal de movimiento del terreno más pequeña que se pueda registrar. Esto esta limitado, en los instrumentos de hoy en día, por el ruido generado en las componentes electrónicas (tanto en el sensor como en el registrador), mientras que antes, la ganancia en los amplificadores era el factor limitante, por lo que un sismómetro con una constante de generador alta implicaría un registro más sensitivo.

2.2.3 Rango dinámico

El rango dinámico es la razón entre la señal más grande y las más pequeña que el sensor puede registrar (Havskov y Alguacil, 2002). Idealmente, esto debería ser más de 200 dB, pero los registradores solo alcanzan valores entre 130 y 155 dB.

Como ejemplo, en la Figura 2.7 se muestra un esquema de la dependencia frecuencial para el sismómetro Trillium

120 P. Como se puede ver, el límite mayor esta impuesto por la línea negra continua denominada "Trillium Clip Level", y el límite inferior con la línea negra punteada denominada "Trillium 120 Self Noise". Para determinar el rango dinámico en una determinada frecuencia lo que se toma es la diferencia entre estos dos límites, obteniendo así el rango dinámico en unidades de dB .

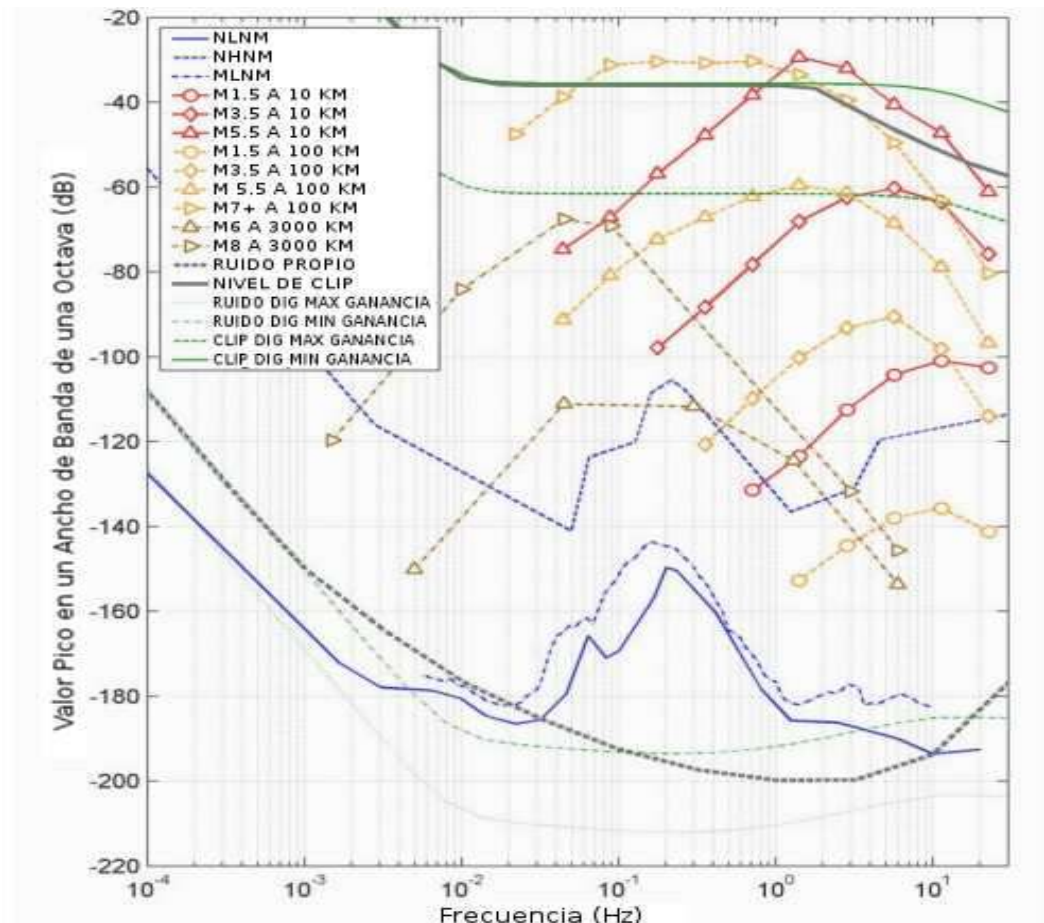


Figura 2.7: Rango Dinámico del sensor sísmico Trillium 120P.

2.2.4 Linealidad

Idealmente, se quiere que un sensor se comporte como un sistema lineal de manera que si, e.g. al duplicar la entrada, la salida será igualmente duplicada. Aquí es donde los sensores pasivos tienen la dificultad de hacer que el resorte se comporte linealmente. Los sensores activos son mucho más lineales ya que presentan poquísimo movimiento. Un buen sensor debería tener una linealidad mejor al 1 %. Este factor no está siempre especificado por lo que resulta complicado comparar los sensores a partir de él.

2.2.5 Sensitividad del Eje Cruzado

Cuando tres sensores son montados juntos, habrá frecuentemente un punto de encuentro, lo que implica, e.g. que un gran movimiento en la dirección Z, causaría una señal pequeña en la componente horizontal. Esta sensibilidad debe ser normalmente menor al 2%.

2.3 Sismómetros de la REDSSAT-IGP

La Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis, esta equipada por sismómetros de banda ancha de la marca Nanometrics, correspondientes al modelo Trillium Compact. El cual presenta una topología tri-axial. Es un sismómetro electromagnético con feedback basado en el principio de fuerza-balance. Más características se detallan a continuación.

2.3.1 Trillium Compact

El Trillium Compact es un sismómetro de banda ancha de tres componentes con bajo niveles de ruido. Es una alternativa conveniente y de fácil instalación. Cuenta con un rango frecuencial extendido que va más allá de los 1000 s, es ideal para el estudio de sismos registrados a distancias telesísmicas, regionales y locales (Figura 2.8).



Figura 2.8: Sismómetro Trillium Compact.

En este modelo de sensor, su arreglo de simetría tri-axial (Figura 2.9) asegura una uniformidad entre las salidas de las componentes verticales y horizontal.

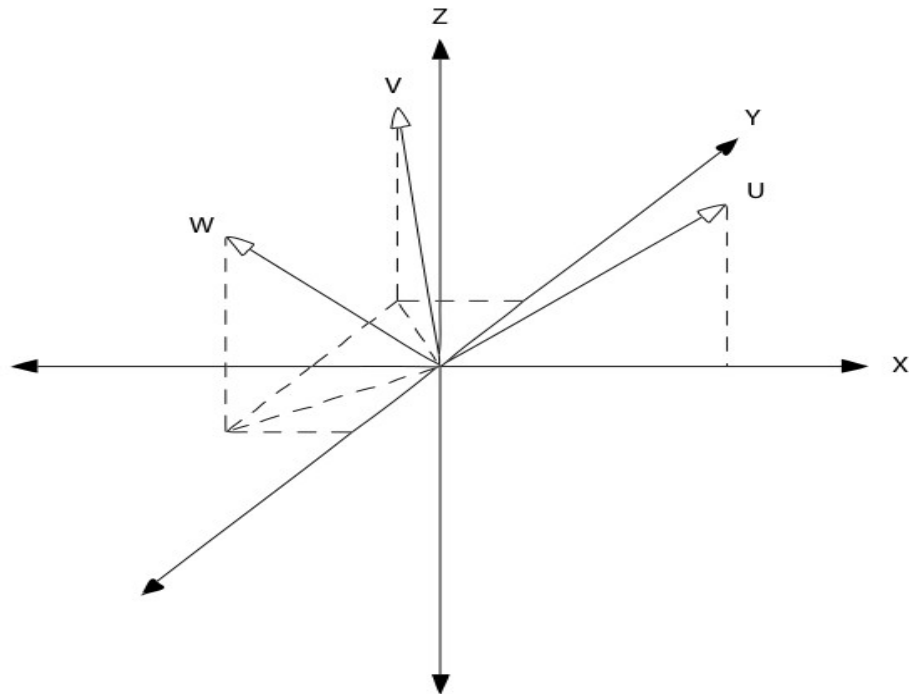


Figura 2.9: Orientación de los ejes del Sismómetro Trillium Compact.

2.3.1.1 Especificaciones técnicas

Tabla 2.1: Tecnología

Topología	Simetría tri-axial
Feedback	Balance-fuerza con transductor de capacitancia
Centrado de la masa	No requerido

Tabla 2.2: Performance

Ruido Propio	Ver Figura 2.10
Sensitividad	749.1V * s/m nominal ± 0.5 precisión
Sensitividad fuera de eje	± 0.5
Ancho de banda	-3 dB a 120.2 s y a 108 Hz
Función transferencia	Polos esquina dentro ± 0.5 del valor nominal

	Polos y ceros de alta frecuencia dentro de ± 0.5 del valor nominal
	Sin pico de respuesta a frecuencias altas
Clip level	26 mm/s de 0.1 Hz a 10 Hz
Inclinación	Rango de inclinación dinámico y operacional de $\pm 2.5^\circ$
Resonancias parásito	Ninguna por debajo de 200 Hz

Tabla 2.3: Interfase

Conector	14-pin
	Shell size 12
	MIL-C-26482 Series I
	Montado arriba del case
Salida de la velocidad	40 Vpp diferencial
	Seleccionable XYZ (este, norte, vertical) o modo UVW
Salida de la posición de la masa	Salida de un único voltaje representando la posición máxima de la masa
	Salida por tres canales mediante puerto serial
Entrada de la calibración	Entrada de un solo voltaje y una señal activa-alta de control para habilitar los tres canales
	Modo de calibración remota en modo XYZ o UVW
	Selección independiente del canal mediante puerto serial

Tabla 2.4: Energía

Fuente eléctrica	9 V a 36 V DC con entradas aisladas
Protección	Protección contra voltaje invertido y sobre-voltaje
	Auto-reseteo en caso de sobre-corriente

Tabla 2.5: Características Físicas

Diámetro	90 mm
Altura	113 mm sin patas de nivelación
	128 mm con patas de nivelación totalmente retraídas
	135 mm con patas de nivelación totalmente extendidas
Masa	1.2 kg
Housing	Superficie resistente a corrosión, raspaduras y cortes
Nivelamiento	Burbuja niveladora integrada
	Patas niveladoras ajustables
	Trípode para rápida nivelación opcional
Alineamiento	Marcas Norte-Sur
Resistencia climática	Clasificado IP67 para uso externo, polvo y resistencia a inmersión

Tabla 2.6: Características Ambientales

T° Operacional	-40°C a 60°C
T° Almacen.	-65°C a 75°C
Golpes	100 g half sine, 5 ms sin daños,
	No requiere asegurar la masa para transportar
Magnetismo	Insensitivo a variaciones naturales del campo magnético terrestre.

2.3.1.2 Ruido instrumental

El ruido típico de un sismómetro Trillium Compact se muestra en la Figura 2.10. Tres curvas son agregadas como referencia: NLNM y NHNM correspondientes a los límites máximos establecidos por Peterson (1993), y MLNM correspondiente al nuevo límite propuesto por McNamara y Buland (2004). La especificaciones de ruido mínimo mostradas son validas para cuando la masa esta centrada dentro de $\pm 0.4V$.

El ruido se incrementara a frecuencias bajas si la masa se descentra más. El ruido a 100 segundos podría elevarse hasta $-168dB$ si la masa esta fuera del centro por más del máximo $\pm 4.5V$. Entonces, para obtener el mejor rendimiento se recomienda asegurar que las masas estén bien centradas y para ello se requiere realizar una adecuada instalación.

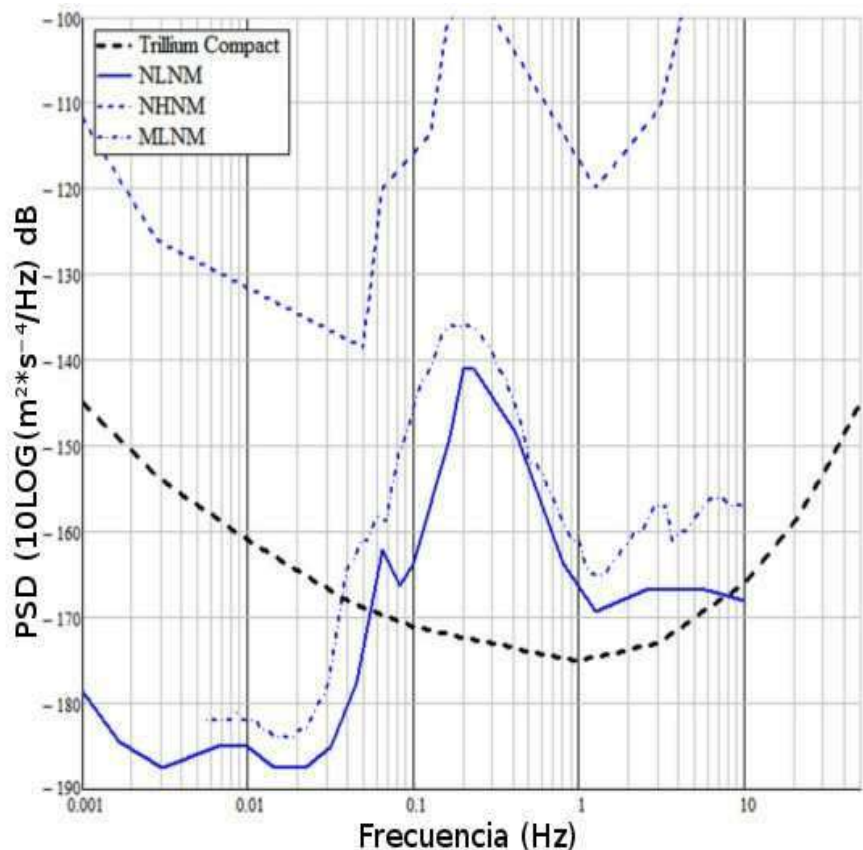


Figura 2.10: Ruido Propio del Sismómetro Trillium Compact.

2.3.1.3 Rango Dinámico

Para determinar el rango dinámico del sensor Trillium Compact para una frecuencia de interés, se tiene que comparar el ruido mínimo con el nivel de clip del sensor. La Figura 2.11 se usa para esta comparación.

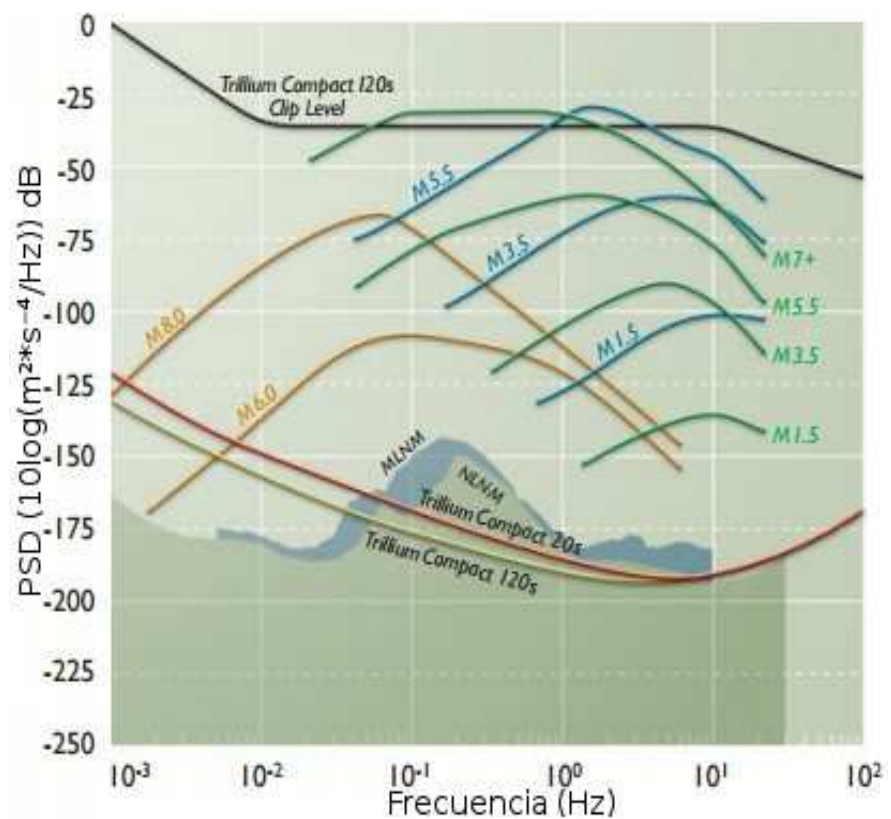


Figura 2.11: Trillium Compact, rango dinámico. Líneas Azules eventos locales (<10 km). Líneas verdes, eventos regionales (>10 km). Líneas Naranjas (>3000 km).

2.3.1.4 Función Transferencia

La Figura 2.12 muestra un diagrama de Bode, en él se tiene la representación del movimiento del terreno, la entrada de calibración del circuito y la respuesta de calibramiento para los sismómetros Trillium Compact. Se puede ver que la respuesta amplitudinal es prácticamente idéntica al movimiento del terreno. Mientras que la respuesta de fase es ligeramente diferente a frecuencias altas.

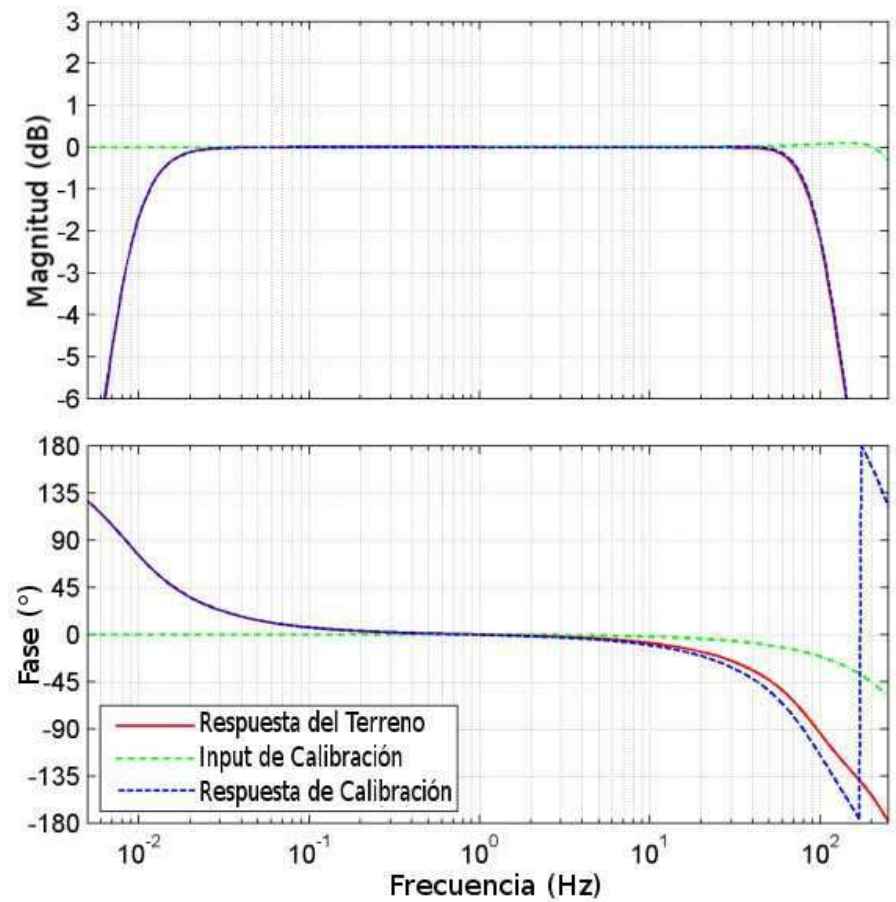


Figura 2.12: Diagrama de de Bode para sismómetros Trillium Compact. Línea Roja, respuesta del terreno. Línea verde, señal de entrada de la calibración. Línea Azul, respuesta de la calibración.

CAPÍTULO III REDES SÍSMICAS

3.1 Generalidades

A mediados del siglo XX, tan solo habían estaciones sísmicas que operaban individualmente al margen de las demás. Por ejemplo, la primera estación que opero en el Perú, aunque por poco tiempo, lo hizo en el año 1907, le siguió en 1931 una estación instalada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos en la ciudad de Huancayo. Estas, como muchas otras, hacían sus propias observaciones y la información recolectada era enviada posteriormente a un centro de procesamiento internacional.

Cuando en una región o un país operaba más de una estación, entonces era posible empezar a hablar de redes. Fue en la década del setenta cuando comenzaron a funcionar estas redes, e.g. la Red Sísmica Mundial fue uno de los primeros sistemas en llamarse propiamente red sísmica. Esta red incluso tenía cobertura en nuestro país (Naña-Lima y Characato-Arequipa).

Actualmente, el criterio para definir un conjunto de estaciones como red es que las señales sean transmitidas en tiempo real hacia una central de registro, donde toda la información sea registrada con un tiempo de referencia común. Una vez cumplidos estos criterios, es recién posible tener estaciones sincronizadas con un buen grado de precisión y, así, hacer que la localización de sismos sea más acertada.

La evolución de las telecomunicaciones, ha permitido que las redes sísmicas puedan ser ahora locales, regionales o globales. Hoy en día, la distinción entre redes se da principalmente, no debido a las diferencias en la transferencia de datos, si no según el enfoque de la investigación que se este realizando, a la resolución espacial, y a la calidad de información en términos de contenido frecuencial y rango dinámico.

3.2 Objetivos de una Red Sísmica

Los objetivos de una red sísmica son:

- Determinar la ubicación y magnitud de eventos sísmicos.
- Monitorizar la sismicidad (sistema de alerta)

- Colectar datos para futuras investigaciones sismológicas

3.2.1 Determinación de Epicentros

Este objetivo es el más importante ya que resulta el pilar para cualquier otra meta. Para calcular las tres coordenadas hipocentrales de un sismo (latitud, longitud y profundidad), se necesita por lo menos el tiempo de llegada de la onda P en tres estaciones, o cuatro si es que el tiempo de origen tiene que ser determinado. Por otro lado, la distancia hipocentral puede ser determinada para cada estación, a partir de la diferencia de los tiempos de llegadas de las fases sísmicas, i.e. S-P (Figura 3.1).

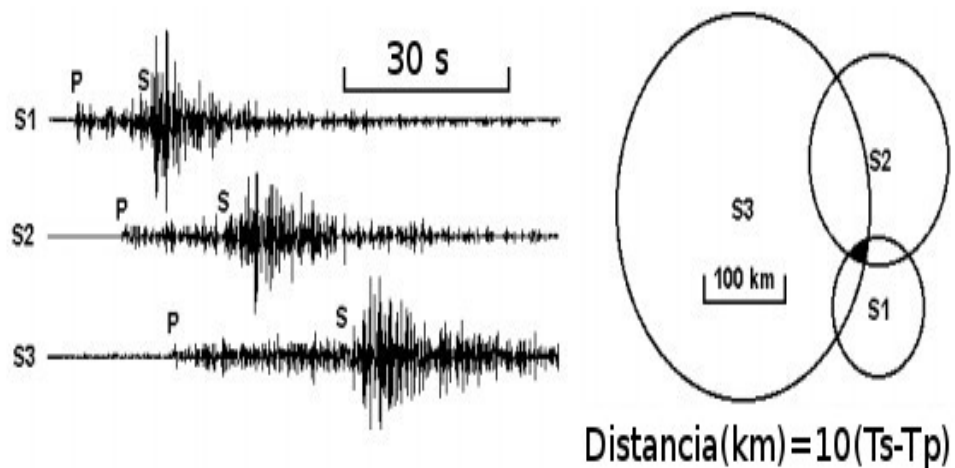


Figura 3.1: Registro sísmico de tres estaciones y método gráfico para localización de epicentros.

3.2.2 Monitoreo de la Sismicidad

El monitoreo constante de la actividad sísmica en una determinada área es el elemento fundamental para que una red sísmica cumpla con la función de realizar el seguimiento temporal de la sismicidad. Esta información permite elaborar mapas de la distribución espacio/temporal de la sismicidad y así conocer más sobre las zonas sismogénicas de cada región .

Por otro lado, el monitoreo sísmico no se limita tan solo a los eventos ocasionados por la naturaleza, sino también a sismos inducidos generados por las actividades del hombre. En general, el monitoreo puede ser:

- Monitoreo sísmico de zonas tectónicas activas
- Monitoreo sísmico de regiones volcánicas, en este caso se puede pronosticar las erupciones.
- Monitoreo de sismicidad inducida por grandes represas o cerca de áreas mineras.
- Monitoreo de las explosiones, particularmente las pruebas nucleares.

3.2.3 Registro y Almacenamiento de Información

El objetivo más antiguo de la sismología es el estudio del interior de la Tierra. Para esto, las redes sísmicas registran y almacenan información que luego permita estudiar a detalle la estructura, naturaleza y comportamiento del interior de la Tierra.

Adicionalmente, los catálogos sísmicos permiten ayudar en la mitigación del peligro sísmico a largo plazo, mediante mapas de peligro sísmico y mapas sismo-tectónicos, los que son utilizados para definir reglamentos para el sector construcción.

3.3 Geometría de la Red

La geometría de la red juega un papel importante en la precisión con la que se localizan eventos sísmicos. Como se sabe, 3 estaciones son requeridas para resolver un epicentro preliminar (Figura 3.2). Idealmente el epicentro se debe encontrar dentro del área abarcada por la red, ya que la ubicación se vuelve menos confiable a mediada que el epicentro se ubica fuera de la red. La brecha azimutal (el ángulo mayor entre las líneas conectando un potencial epicentro con todas las estaciones de la red, que registraron el evento) debería ser menor a 200° . Adicionalmente se puede realizar una determinación azimutal en el caso de que las condiciones así lo requieran (lado derecho de la Figura 3.2)

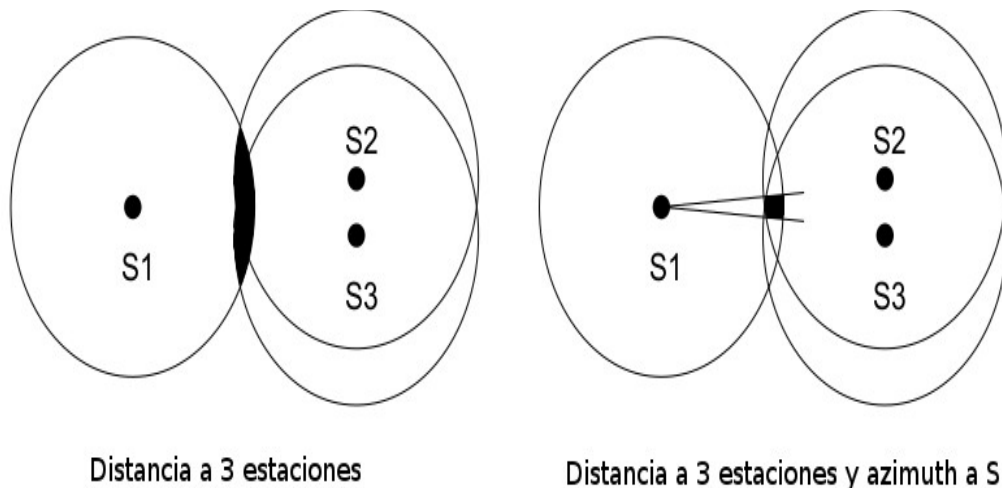


Figura 3.2: Geometría de red para estaciones alineadas, con y sin determinación azimutal (izquierda y derecha respectivamente).

La densidad de estaciones, bajo condiciones iguales de ruido, determina el umbral de detección (menor magnitud que pueda ser detectada). Así, para instalaciones con altos niveles de ruido son necesarias más estaciones si se quiere tener el mismo umbral de detección de una red con bajos niveles de ruido. Adicionalmente, las estaciones podrían ser ubicadas más cerca del área de interés.

La profundidad hipocentral es incluso más difícil de calcular con precisión. Para obtener una buena estimación, la estación más cercana no debe estar a más de una o hasta dos veces la profundidad hipocentral. Para muchos lugares, las distancias típicas son de 5 hasta 20 km, de manera que para obtener buenas profundidades se requiere una red mucho más densa de lo que se considera posible práctica o económicamente. Por lo tanto, es importante ubicar estaciones cerca de las áreas consideradas activas, donde la determinación hipocentral es importante. La distribución de las estaciones puede entonces parecerse a la de los sismos.

Existe software computacional capaz de calcular la configuración óptima de una red, dando el número de estaciones, áreas de fuentes de preferencia, y tamaño de la red. Alternativamente, los programas pueden dar la precisión con la cual se podría determinar un evento sísmico, dada una configuración determinada. Sin embargo, estas determinaciones son la mayor parte del tiempo irreales, debido a que no considera factores de accesibilidad, geología, suministro energético, comunicación, etc. Sin embargo, los programas pueden resultar útiles en el caso que se quiera implementar estaciones adicionales a redes ya establecidas.

3.4 Despliegue de Estaciones Sísmicas

Determinar la ubicación de una estación no es tan fácil como poner el sensor en determinado lugar y empezar a registrar señales. La información que se colectaría estaría contaminada de ruido, y a fin de cuentas no será óptima. Lo que se busca es que la estación esté tan libre del ruido ambiental como sea posible, de manera que el registro de señales producida por sismos (sobre todo los poco energéticos) sea más fácil. Sin embargo, una situación ideal es casi imposible de concebir, por lo que se debe definir la ubicación procurando el bajo costo y la estabilidad operacional a largo plazo. A continuación se detallan ciertas recomendaciones que deben ser tomadas en cuenta al establecer una estación sísmica.

3.4.1 Consideraciones Energéticas

La energía requerida por el equipo puede variar entre 1 hasta más de 100 W, dependiendo del tipo de estación. Las exigencias de una estación de alto consumo eléctrico, requieren una conexión a una red eléctrica, mientras que las de menor necesidad energética se pueden valer de celdas solares, en dicho caso se consideran el tamaño de las baterías y de la celda a utilizarse.

3.4.2 Consideraciones de Comunicación

Si la estación transmitirá vía radio, es necesario que la estación esté localizada cerca de la cima de una montaña. Por otro lado, las estaciones satelitales no presentan estas limitaciones, pero sí requieren más energía. Las comunicaciones mediante cableado requieren una estación que se encuentre cerca de líneas de telefonía, este mayormente no es el caso, además de los elevados costos que representaría la implementación de este tipo de sistema.

3.4.3 Consideraciones de Seguridad

Desafortunadamente, las estaciones son frecuentemente víctimas de robos y vandalismo. Para evitar estos problemas, una construcción a prueba de estos inconvenientes, así como un posicionamiento estratégico es necesario.

3.4.4 Consideraciones de Accesibilidad

Una ubicación idónea puede que requiera que la inmersión al lugar sea hecha vía helicóptero, lo que representa en la mayoría de los casos un esfuerzo insolventable.

3.4.5 Consideraciones Climáticas

Las áreas con condiciones de alta humedad, climas extremos, o áreas cálidas, o con alta probabilidad de tormentas eléctricas deben ser evitadas.

3.4.6 Consideraciones Topográficas

Es recomendable evitar topografías abruptas, que puedan modificar las ondas sísmicas, sin embargo, esto es contraindicativo con respecto a la necesidad de ubicar estaciones en las partes altas de las montañas para tener una mejor comunicación.

3.4.7 Consideraciones Geológicas

Es indiscutible que un sensor en un suelo "no compacto" es mucho más ruidoso que uno ubicado en roca sólida, así que estos suelos deben ser evitados.

3.4.8 Consideraciones de Ruido Sísmico

En el CAPÍTULO IV se discutirá detalladamente todo lo que concierne a la evaluación del ruido sísmico.

A groso modo, lo que se busca es definir si los niveles de ruido son inferiores al límite máximo definido por Peterson (1993) (ver Figura 3.3). Los niveles se evalúan en periodos diurnos y nocturnos, de verano e invierno; sin embargo, esto raramente se realiza. En la mayoría de los casos, debería ser posible obtener 24 horas de registros como mínimo, para detectar la periodicidad de algún ruido local

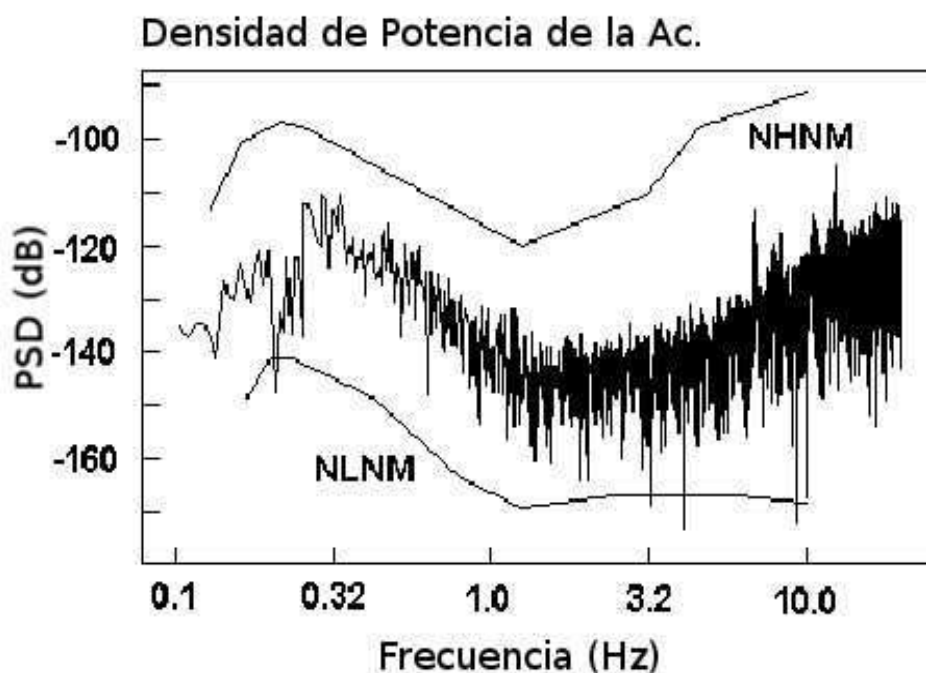


Figura 3.3: Representación de los Niveles de Ruido Sísmico

3.5 Elección de los Sensores Sísmicos

La elección del sensor depende de su uso en redes de monitoreo local, regional o global. Los factores determinantes a considerar son los siguientes:

- Tipo de sensor - acelerómetros o sismómetros
- Numero de componentes por estación sísmica
- Sensitividad del sensor y rango dinámico
- Rango frecuencial de operación del sensor
- Costos de instalación y operacionales

3.5.1 Tipo de Sensor

Si se considera el grado de intensidad sísmica, en los lugares donde no se presentan eventos sísmicos grandes, bastaría con utilizar sismómetros de banda ancha. Por otro lado, en zonas donde ocurren grandes eventos sísmicos, los registros acelerométricos y los datos geodésico de GPS son de suma importancia.

Entonces, lo que se busca es poder cubrir todo el rango dinámico de un evento sísmico, por lo tanto, ambos tipos de sensores trabajan en conjunto. Haciendo posible así, cubrir desde el ruido sísmico de menor magnitud, hasta el evento de mayor magnitud que se pueda presentar.

3.5.2 Número de Componentes

Hoy en día, para la mayoría de los proyectos de investigación se necesita tanto la información de las componentes horizontales como la de la vertical. De ellas, las componentes horizontales se ven afectadas por los efectos del suelo; sin embargo, la componente vertical no. Esta consideración es tomada en cuenta se necesita instalar estaciones uni-axiales.

3.5.3 Rango Frecuencial de Interés

La elección del sensor más idóneo, depende de la aplicación sismológica a la que sea destinado, de manera que la banda frecuencial de registro, cubra en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración todo el rango de interés de la investigación).

La clasificación de los sensores de hoy en día es la siguiente:

- Sismómetros de periodo corto (SP), registran señales de 0.1 a 100 Hz aproximadamente, con una frecuencia corte de 1 Hz. Para frecuencias mayores al corte presentan respuestas plana a la velocidad del terreno.
- Sismómetros de banda ancha (BB) tienen una respuesta plana a la velocidad del terreno desde 0.01 hasta los 50 Hz.
- Sismómetros de banda muy ancha (VBB), pueden registrar frecuencias desde 0.001 Hz hasta 10 Hz aproximadamente.
- Acelerómetros, registran señales de hasta 200 Hz. Varían de los sensores de los sismómetros ya que la entrada de voltaje es proporcional a la aceleración del terreno, y no a la velocidad, enfatizando así las frecuencias altas.

3.6 Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis a cargo del Instituto Geofísico del Perú

Los devastadores terremotos de Pisco (2007) y Arequipa (2001) pusieron a prueba la eficacia del anterior sistema de monitoreo sísmico del Perú. Desafortunadamente, la saturación y el colapso de los sistemas de comunicación dificultaron la disponibilidad de la información, evitando así que se puedan emitir los reportes sísmicos de alerta, respectivos. Es así, que en el 2010 el Gobierno Peruano destina el presupuesto para comenzar la implementación de la Red Sísmica para la Alerta Temprana de Tsunamis (ver Figura 3.4). El objetivo de esta red es de identificar los sismos que generen tsunamis con un sistema confiable y eficiente, que no sea susceptible a dejar de funcionar en situaciones de emergencia.

Hoy en día, la REDSSAT-IGP cuenta con sismómetros y acelerómetros que vigilan constantemente la actividad sísmica dentro del territorio nacional. Como bien se sabe, la inmediatez y disponibilidad de la información son factores necesarios para poder definir estados de alerta pertinentes.

La secuencia operativa de la Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis sigue los siguientes pasos:

- Registro de banda ancha por más de 30 estaciones sísmicas de todos los movimientos telúricos a lo largo del todo territorio nacional.
- Transmisión satelital en tiempo real al Servicio Sísmológico Nacional del Instituto Geofísico del Perú.
- Procesamiento y análisis de eventos sísmicos por los profesionales del Instituto Geofísico del Perú.
- Emisión del Reporte Sísmico; en el caso que, se determine que un sismo sea tsunamigénico, el reporte sísmico es emitido en un mínimo tiempo con la Alerta de tsunami.
- Envío de los reportes en primera instancia a la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra y el Instituto de Defensa Civil.

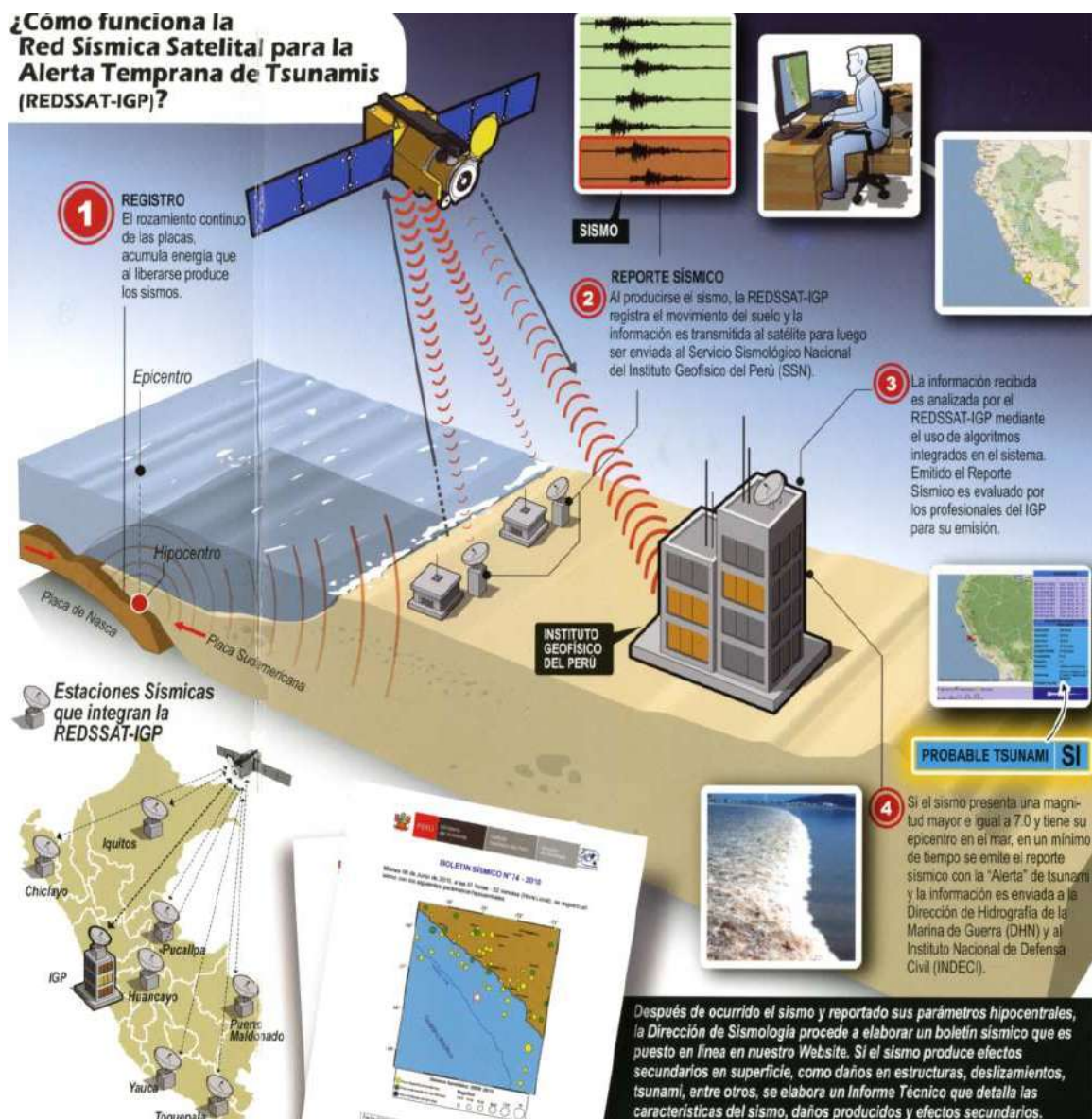


Figura 3.4: Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis.

CAPÍTULO IV RUIDO SÍSMICO

Al momento de la implementación de una estación sísmica se procura buscar ubicaciones estratégicas, considerando básicamente la baja presencia de ruido de fondo. Estos lugares, por lo general, están ubicados en zonas alejadas de la población, donde los aspectos de seguridad y mantenimiento del equipo tienen implicancias económicas, que sumadas a los elevados costos del instrumental resultan en un esfuerzo difícil de alcanzar. Por esto, se tiene que sacrificar condiciones geológicas y geográficas ideales para buscar el equilibrio entre costos y beneficios, aunque se pierda calidad en la señal sísmica.

En general, la información óptima que una estación sísmica ofrece dependerá de la relación entre la señal y el ruido, esperando sea lo suficientemente alta, de modo que permita obtener registros de calidad. Entonces, para determinar la calidad de la información sísmica es necesario evaluar los niveles del ruido de fondo, comparando sus características espectrales con estándares mundiales ya definidos. El presente capítulo describe los procedimientos necesarios para realizar la evaluación del ruido en una estación sísmica, considerando su análisis espectral y su comparación con los estándares mundiales.

4.1 Señales Sísmicas

Las señales sísmicas son ondas momentáneas irradiadas a partir de una fuente sísmica natural (e.g. rupturas en la corteza, deslizamiento de fallas) o artificial (e.g. explosivos, bombas). Estas señales son utilizadas para ubicar la fuente, analizar el proceso de ruptura de la fuente y/o estudiar la estructura del medio de propagación. Por otro lado, se le considera como ruido de fondo, a todo movimiento del terreno que no corresponda a la señal que se quiera investigar. Entonces, lo que se considere como ruido dependerá del objetivo del estudio y del método de análisis que se aplique.

4.1.1 Calidad del Registro

Al momento de la determinación de los parámetros hipocentrales es necesario que el registro muestre las principales fases sísmicas claramente marcadas. Sin embargo, cuando un sismo no es lo suficientemente energético o cuando los niveles de ruido son demasiado altos, el registro del evento sísmico puede llegar a

ser distorsionado o incluso opacado totalmente por el ruido de fondo. La Figura 4.1 muestra dos señales sísmicas, la primera corresponde al dato crudo, en la cual aparentemente no se presentan eventos sísmicos y la Figura 4.1b corresponde al mismo registro luego de que el ruido sísmico ha sido filtrado adecuadamente, en el segundo registro se observa dos sismos que no hubieran sido posibles de identificar en el primer registro.

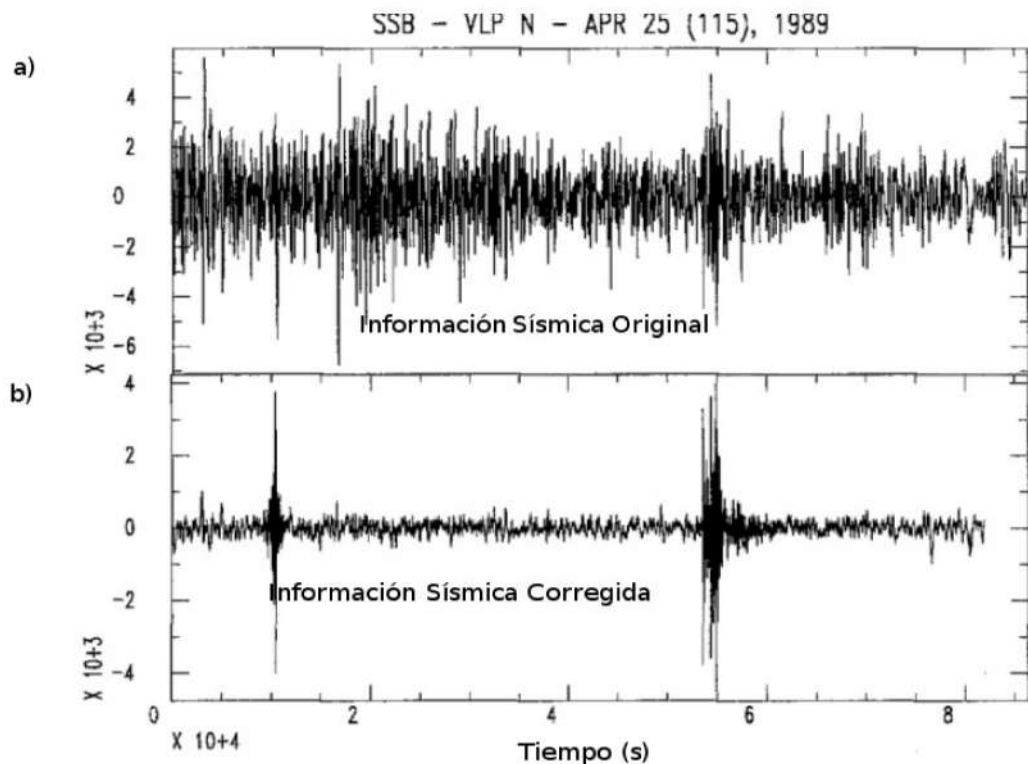


Figura 4.1: a) Traza sísmica con altos niveles de ruido de fondo. b) la misma traza sísmica sin el ruido de fondo.

4.1.2 Umbrales de Detección

Los estudios de ruido sísmico sirven como base para definir los umbrales de detección en una estación sísmica. La Figura 4.2 muestra un diagrama donde las líneas negras continuas definen los límites de ruido máximo y mínimo establecidos por Peterson (1993), y las líneas punteadas definen el comportamiento frecuencial de ondas de cuerpo de periodo largo y de ondas superficiales con sus respectivas magnitudes (M_w o M_s) y distancias hipocentrales. Al utilizar este tipo de diagramas, se puede comparar el nivel de ruido de fondo en una estación con los diferentes tipos de eventos sísmicos, determinando así los arribos de ondas que la

estación podría resolver.

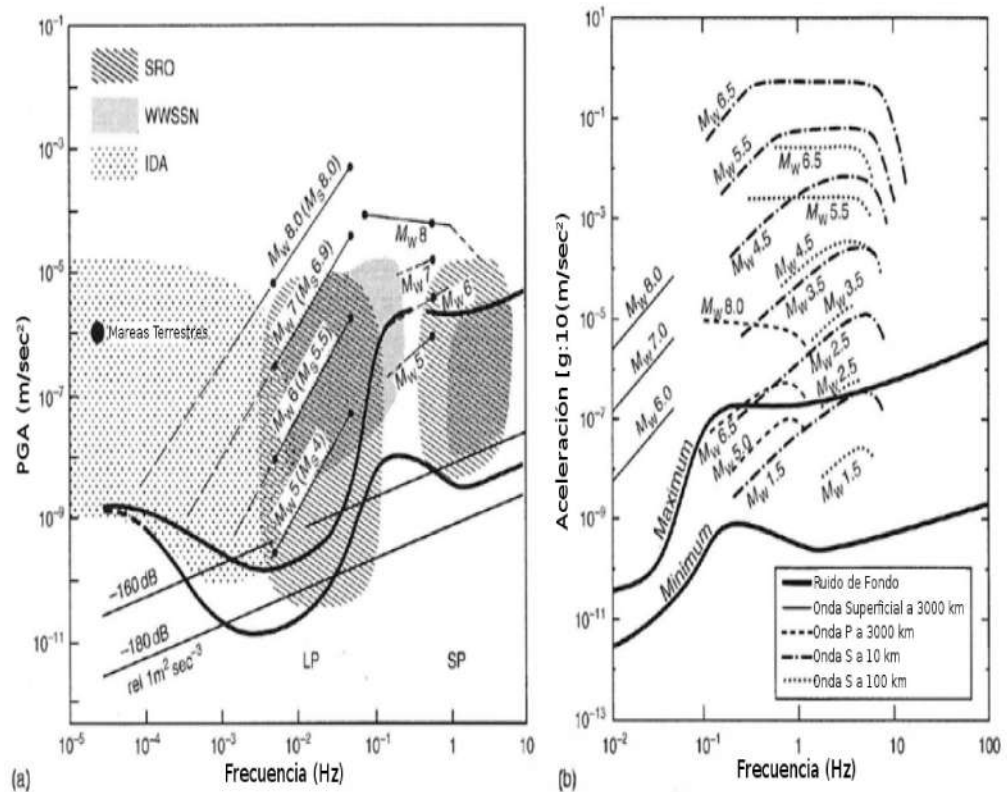


Figura 4.2: a) Amplitudes de arribos de ondas sísmicas a distancias locales y ruido de la componente vertical según los modelos de Peterson (1993) (Lineas negras). Las zona sombreadas representan los rangos dinámicos de diferentes redes sísmicas. b) lo mismo que en a) para amplitudes de arribos a distancias regionales.

En general, los estudios de ruido de fondo permiten determinar los umbrales de detección. Para ello, la manera más eficaz sería realizar un análisis espectral de la señal sísmica utilizando la Transformada de Fourier y sus diferentes aplicaciones.

4.2 Análisis Espectral

Antes de cualquier tipo de hipótesis *a priori* que se quiera realizar acerca del ruido de fondo, es necesario comprender los fundamentos matemáticos del procesamiento de la información y del análisis espectral.

4.2.1 Transformada Continua de Fourier

La señal sísmica irradiada desde una fuente, ya sea por ruptura de la corteza o inducida por alguna fuente artificial, es la representación de una función del

desplazamiento o la velocidad del terreno, ella puede tener duración finita de milisegundos o de minutos como máximo. De acuerdo al teorema de Fourier cualquier función momentánea $f(t)$ y arbitraria en el dominio del tiempo puede ser representada por su equivalente función $F(\omega)$ en el dominio frecuencial. La representación matemática entre los dos dominios es definida por la transformada integral de Fourier.

$$f(t) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (4.1)$$

$$F(\omega) = |F(\omega)| \exp(i\varphi(\omega)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (4.2)$$

La transformada de Fourier también puede ser expresada en términos de cosenos y senos, pero para los estudios de propagación de ondas, se prefiere usar el término $\exp(i\omega t)$ en la Ec. (4.1) o $\exp(-i\omega t)$ en la Ec. (4.2). Se elige esta notación con el objetivo de asegurar que el vector de número de onda sea positivo en la dirección de propagación de la onda. La normalización por $(2\pi)^{-1}$ puede ser aplicada en la transformada inversa o directa, o su raíz cuadrada en ambos casos. $f(t)$ necesita ser una función continua en un sentido matemático pero debe ser definida en cada instante de tiempo.

$F(\omega)$ es la transformada compleja de Fourier de la señal continua $f(t)$, usualmente escrita como una función de la frecuencia angular ω , la que es 2π veces la frecuencia normal (el número de ciclos por segundo). El valor absoluto de la transformada de Fourier, $|F(\omega)|$, es llamado espectro de amplitud, y su fase $\varphi(\omega)$ el espectro de fase. La Figura 4.3 muestra un señal en el dominio del tiempo y su respectiva representación en el dominio frecuencia. La fase puede ser medida en ciclos (2π radianes) o en grados; sin embargo, los radianes son usados en la mayoría de las formulaciones matemáticas.

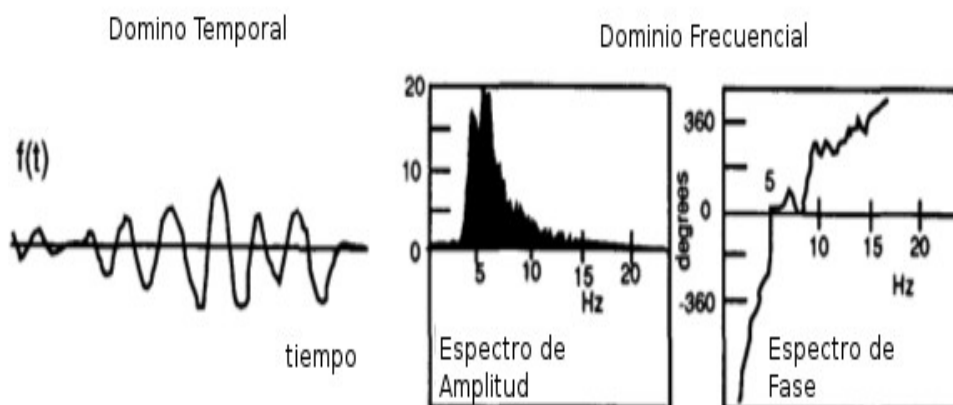


Figura 4.3: $f(t)$, la señal en el dominio del tiempo (a la izquierda) puede ser descompuesta en el dominio de la frecuencia por su Espectro Complejo de Fourier. La amplitud (medio) y la fase (derecha) ambas son necesarias para recrear la señal en el tiempo (Lay y Wallace, 1995).

Considerando que la integral de la Ec. (4.1) es equivalente a la suma de los términos frecuenciales, la transformada de Fourier implica que una señal momentánea y arbitraria, incluso una de naturaleza impulsiva, pueda ser representada como la suma de funciones armónicas en el tiempo (sinusoidales). La Figura 4.4 ilustra como la suma de términos armónicos pueden resultar en una función arbitraria.

En general, los procesos de filtrado son esencialmente realizados en el dominio frecuencial (e.g. un filtro pasa-banda) y reducen la amplitud de las componentes armónicas de la señal a fin de suprimir el ruido. Sin embargo, se debe tener en cuenta que cualquier modificación en amplitud de la señal, conlleva al cambio de las magnitudes de los eventos sísmicos; por lo tanto debe considerarse que dos diferentes señales sísmicas serán comparables solo cuando provengan de registros digitales filtrados con los mismos parámetros. Las diferencias sistemáticas entre las distintas escales de magnitud, así como los efectos de saturación, son consecuencia del filtrado de las señales de entrada (Bormann y Wielandt, 2013).

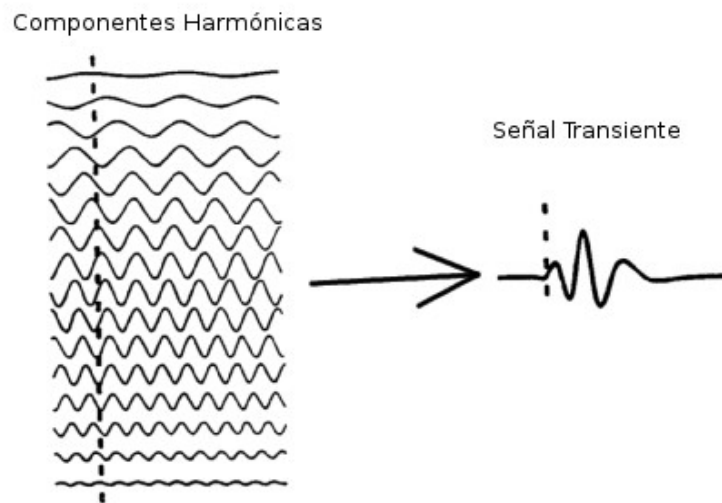


Figura 4.4: Una señal (derecha) esta formada por la suma de sus términos armónicos. Las amplitudes de cada termino armónico varia, siendo definidas por el espectro de amplitud $|c_i|$. El cambio de fase de cada componente armónica esta definido por el espectro de fase.

4.2.2 Análisis Espectral de Señales Estacionarias (Ruido)

Cuando se realiza el análisis del ruido de fondo, normalmente no es de interés la forma exacta de la onda, sino las características del ruido. En la mayoría de los casos, solo es necesario analizar la señal estacionaria para determinar que tan energético es el ruido. Si bien, con la aplicación de filtros es posible suprimir el ruido en una banda espectral, *a priori* es necesario conocer las características del ruido.

Por lo tanto, es necesario considerar que las mediciones de la fuerza de una señal momentánea y una estacionaria son incompatibles y no se pueden comparar fácilmente. Desde el punto de vista físico, las señales momentáneas tiene energía finita y una potencia de cero (en el promedio de todo el tiempo); mientras que, las estacionarias tienen energía infinita y potencia finita. Para la cuantificación del ruido estacionario, el concepto de Densidad Espectral de Potencia (PSD) es apropiado; mientras que, las señales momentáneas son mejor representadas por su Densidad espectral de energía (ESD). La relación entre las dos densidades es trivial; sin embargo, su descripción físico-matemática es necesaria para explicar como se calculan y se usan.

En general, la densidad espectral $P(\omega)$ de alguna cantidad Q es una función de la frecuencia. La integral de $P(\omega)$ sobre una determinada banda frecuencial (como la banda pasante de un sismograma específico) da la cantidad total de Q en esa banda. Cuando Q es la potencia de una señal, la dimensión física de P es "potencia por ancho de banda" (o potencia/Hertz). Sin embargo, no todas las cantidades que tengan las dimensiones físicas "X/Hertz" son un tipo de densidad espectral. Por ejemplo, la transformada de Fourier $F(\omega)$ en la Ec. 4.2, tiene dimensiones $\mu m/Hz$ cuando la señal sísmica $f(t)$ es medida en μm , pero su valor absoluto $|F(\omega)|$ no representa la "densidad espectral de la amplitud" de la señal.

Debe entenderse que al momento de integrar $|F(\omega)|$ sobre un ancho de banda, no es de esperarse que la amplitud de $f(t)$ siga en el mismo ancho de banda, ya que necesita la información del cambio de fase de cada componente. La Figura 4.5 muestra la ambigüedad del espectro de amplitud, principalmente para generar la señal en el tiempo, sin los datos de fase.

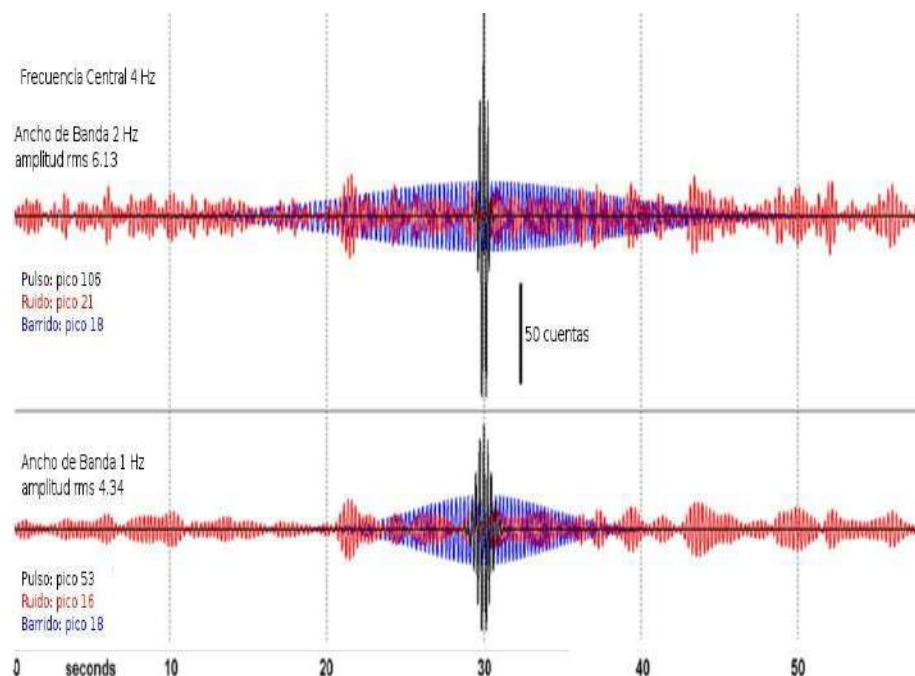


Figura 4.5: En cada registro se superponen tres señales diferentes con un mismo espectro de amplitud, pero con diferente espectro de fase. Los picos amplitudinales son proporcionales al ancho de banda. Cuando el ancho de banda se reduce, la señal del pulso se hace más ancha, el ruido más suave y el barrido más corto.

4.2.2.1 Densidad de Potencia, Energía

Para el análisis de señales, es necesario comprender y diferenciar los Espectros de Densidad de Energía y de Potencia; señales momentáneas y estacionarias, y entre señales continuas y muestreadas. En la práctica, siempre se analiza señales de una longitud finita y momentánea, y para su procesamiento, la señal debe ser muestreada.

4.2.2.2 Señales Continuas

Para el procesamiento de señales continuas, frecuentemente se hace uso de la transformada integral de Fourier (Ecs. (4.1) y (4.2)), debido a la propiedad matemática conocida como el teorema de Parseval.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|F(\omega)|^2}{2\pi} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |F(2\pi\nu)|^2 d\nu \quad (4.3)$$

En el lado izquierdo de la Ec. (4.3), se tiene la energía total de la señal $f(t)$, la cual es finita, incluso si la señal tiene una longitud matemática infinita (por ejemplo, un decaimiento exponencial). El lado derecho entonces representa a la energía como la integral de $E = |F(2\pi\nu)|^2$ sobre todas las frecuencias ν . Entonces, el integrando E , representa la Densidad Espectral de la Energía de la señal. De la misma manera, la Densidad Espectral de Potencia se obtiene al dividir por T , $P = E/T = |F(2\pi\nu)|^2/T$.

4.2.2.3 Señales Muestreadas

En este caso se debe considerar, la señal compuesta por N muestras, tomadas a intervalos equidistantes $\Delta t = T/N$, donde T es la duración total de la señal. La potencia W de tal señal es definida como el promedio del cuadrado de las muestras:

$$W = N^{-1} \sum a_k^2 \quad (4.4)$$

En esta relación, la raíz cuadrada de W es la amplitud efectiva o la amplitud raíz-media-cuadrática a_{rms} de la señal. Ahora, según la propiedad de la transformada discreta de Fourier, se tiene que las Ec. (4.3) queda de la siguiente manera:

$$\sum a_k^2 = N^{-1} \sum |c_l|^2 \quad (4.5)$$

Como en el caso de la señales muestreadas, la potencia total $W = N^{-1} \sum a_k^2 = N^{-2} \sum |c_l|^2$ es ahora expresado como la suma de las contribuciones de diferentes frecuencias. Solo las frecuencias discretas l/T son utilizadas en esta transformación, siendo c_l los coeficientes de Fourier para el muestreo, entonces cada coeficiente representa un intervalo frecuencial de ancho $1/T$ (llamado "bin de frecuencia"). La razón de la potencia, sobre el ancho de banda en la frecuencia $1/T$ queda definida como:

$$P_l = N^{-2} T |c_l|^2 = N^{-1} \Delta t |c_l|^2 \quad (4.6)$$

La serie P_l es el equivalente discreto de la función PSD, ya que permite calcular los PSD para señales estacionarias. En una representación gráfica, la serie P_l es suavizada y decimalizada en razón que los coeficientes originales son normalmente números aleatorios positivos. Este PSD suavizado se acerca, en cada frecuencia, a un limite definido por $N \rightarrow \infty$ cuando la señal es estacionaria. Para señales estacionarias como el ruido de fondo, calcular el PSD de una sección larga pero finita, es la única forma posible de su análisis espectral. Cabe resaltar que el PSD no es equivalente a una transformada de Fourier, la señal no puede ser reconstruida a partir del PSD con una transformada inversa, ya que la información de fase es perdida. Para secciones finitas de una señal de ruido estacionario, se debe utilizar la transformada discreta de Fourier a fin de utilizar su inversa. El PSD suavizado y decimalizado es, sin embargo, normalmente más útil ya que contiene toda la información esencial en forma concentrada, y elimina los factores de

normalización arbitrarios. La equivalente discreta de la Densidad Espectral de la Energía es obtenida con $E_l = T \cdot P_l$.

4.2.2.4 Representación de los PSD

Como se hace en la acústica, la razón de la potencia $r = (a_2/a_1)^2$, entre dos señales de amplitud a_1 y a_2 , es comúnmente expresada en decibelios (dB). Esta es una medida logarítmica que expresa la razón, como una diferencia de logaritmos. La diferencia en dB es $10 \log_{10}[(a_2/a_1)^2] = 20 \log_{10}[(a_2/a_1)]$. Cuando se expresa la densidad espectral de potencia P_a , de la aceleración relativa, a la unidad métrica $1(m/s^2)^2/Hz$, se tiene:

$$P_a[dB] = 20 \log_{10}[P_a / 1(m/s^2)^2/Hz] \quad (4.7)$$

La Figura 4.6, muestra sus unidades de potencia con respecto a la aceleración, velocidad y desplazamiento. Por convención, la utilización de la Densidad de Potencia Espectral con respecto a la aceleración, es la que se utiliza para la evaluación del ruido sísmico.

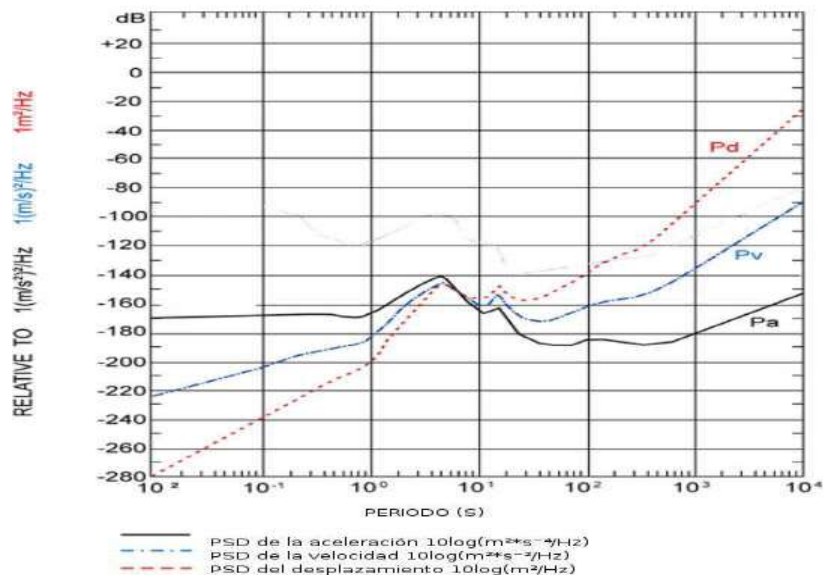


Figura 4.6: PSD de la aceleración, de la velocidad (línea azul) y del desplazamiento (línea roja). Las unidades para P_v y P_d son dB con respecto a $1(m/s)^2/Hz$ y $1(m)^2/Hz$ respectivamente.

Existe otra herramienta útil para el análisis del ruido sísmico a partir de la Función Probabilidad de la Densidad Espectral (PDF), esto fue propuesto por McNamara y Buland (2004). Esta herramienta es mucho más versátil que la representación por PSDs, ya que los niveles del ruido sísmico se expresan en términos de probabilidades. La Figura 4.7 muestra un ejemplo de un PDF, y en el, cada frecuencia esta representado por varios valores de poder espectral con su probabilidad de ocurrencia. En la practica, el PDF es mucho más conveniente y veraz que el simple promedio que utilizaría un PSD. Es por esta razón que, en la actualidad, la mayoría de trabajos de evaluación de ruido de fondo optan por el uso de PDFs.

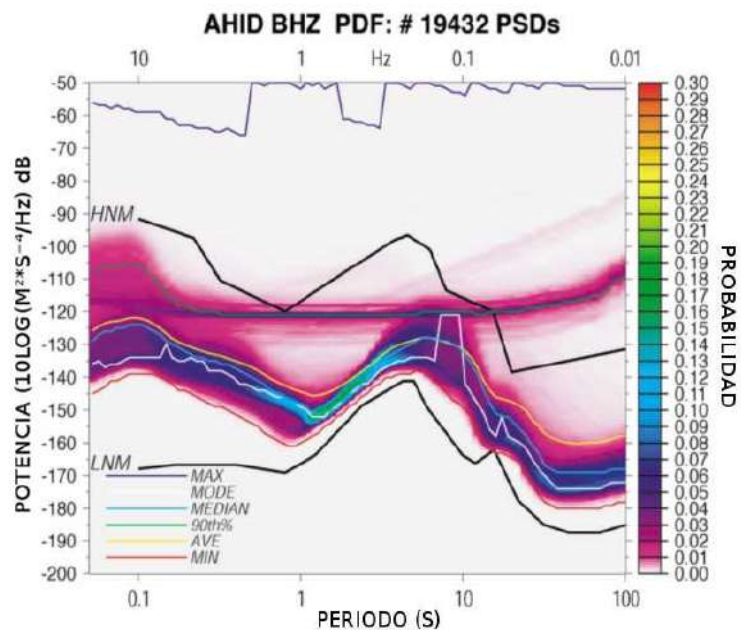


Figura 4.7: PDF para la evaluación de los ruidos de fondo para la estación AHID (McNamara y Buland, 2004).

4.3 Modelo Global de Ruido Sísmico

La Figura 4.8 presenta la compilación de los niveles de ruido sísmico de más de 400 estaciones sísmicas que operan en el mundo, según Peterson (1993). Es con esta información que el autor estableció los estándares mínimos (NLNM) y máximos (NHNM) que se usan en la actualidad para evaluar los niveles de ruido en una determinada estación. Así mismo, en las Tablas 4.1 y 4.2 se muestra los valores de las densidades de potencia en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento.

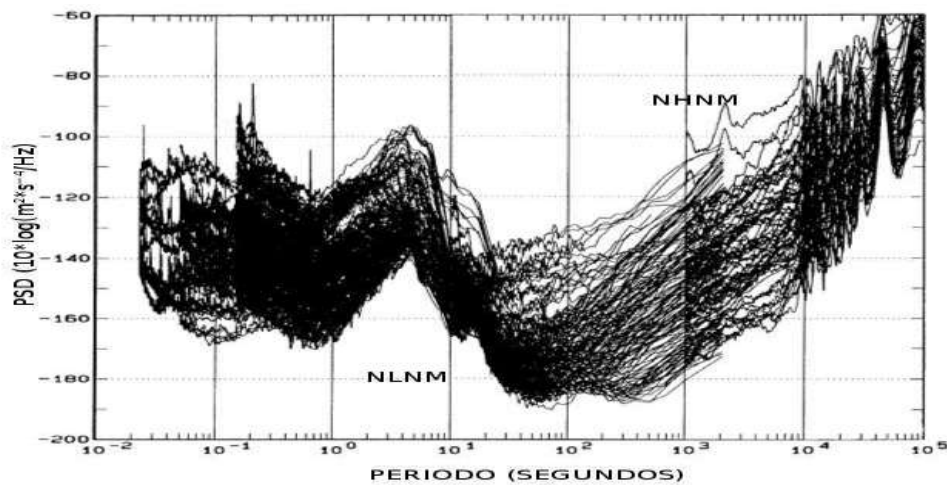


Figura 4.8: Compilación de los espectros de densidad según Peterson (1993). NHNM corresponde al nivel de ruido máximo y NLNM al nivel de ruido mínimo.

Tabla 4.1: Densidad Espectral Máxima de la Potencia del ruido, para periodos determinados, con respecto a la aceleración, velocidad, desplazamiento (Peterson, 1993).

T[s]	Pa[m ² s ⁻⁴ /Hz]	Pa[dB]	Pv[m ² s ⁻² /Hz]	Pv[dB]	Pd[m ² /Hz]	Pd[dB]
0.10	7.1E-10	-91.5	1.8E-13	-127.5	4.5E-17	-163.4
0.22	1.8E-10	-97.4	2.2E-13	-126.5	2.7E-16	-155.6
0.32	8.9E-12	-110.5	2.3E-14	-136.4	6.6E-17	-162.2
0.80	1.0E-12	-120.0	1.6E-14	-137.9	2.6E-16	-155.8
3.80	1.6E-10	-98.0	5.8E-11	-102.4	2.1E-11	-106.7
4.60	2.2E-10	-96.5	1.2E-10	-99.2	6.4E-11	-101.9
6.30	7.9E-11	-101.0	8.0E-11	-101.0	7.9E-11	-101.0
7.90	4.5E-12	-113.5	7.1E-12	-111.5	1.4E-11	-109.5
15.40	1.0E-12	-120.0	6.0E-12	-112.2	3.6E-11	-104.4
20.00	1.4E-14	-138.5	1.4E-13	-128.4	1.4E-12	-118.4
354.80	2.5E-13	-126.0	8.0E-10	-91.0	2.6E-06	-55.9
1E+4	9.7E-09	-80.1	2.5E-02	-16.1	6.2E+04	47.9
1E+5	1.4E-05	-48.5	3.6E+03	35.5	9.0E+11	119.6

Tabla 4.2: Densidad Espectral Mínima de la Potencia del ruido, para periodos determinados, con respecto a la aceleración, velocidad, desplazamiento (Peterson, 1993).

T[s]	Pa[m ² s ⁻⁴ /Hz]	Pa[dB]	Pv[m ² s ⁻² /Hz]	Pv[dB]	Pd[m ² /Hz]	Pd[dB]
0.10	1.6E-17	-168.0	4.1E-21	-203.9	1.0E-24	-239.9
0.17	2.1E-17	-166.7	1.6E-20	-198.1	1.1E-23	-229.4
0.40	2.1E-17	-166.7	8.7E-20	-190.6	3.5E-22	-214.6
0.80	1.2E-17	-169.2	1.9E-19	-187.1	3.2E-21	-214.5
1.24	4.3E-17	-163.7	1.7E-18	-177.8	6.5E-20	-191.9
2.40	1.4E-15	-148.6	2.0E-16	-157.0	3.0E-17	-165.3
4.30	7.8E-15	-141.1	3.6E-15	-144.4	1.7E-15	-147.7
5.00	7.8E-15	-141.1	4.9E-15	-143.1	3.1E-15	-145.1
6.00	1.3E-15	-149.0	1.1E-15	-149.4	1.0E-15	-149.8
10.00	4.2E-17	-163.8	1.0E-16	-159.7	2.7E-16	-155.7
12.00	2.4E-17	-166.2	8.7E-17	-160.6	3.2E-16	-155.0
15.60	6.2E-17	-162.1	3.8E-16	-154.2	2.3E-15	-146.3
21.90	1.8E-18	-177.5	2.2E-17	-166.7	2.6E-16	-155.8
31.60	3.2E-19	-185.0	7.9E-18	-171.0	2.0E-16	-156.9
45.00	1.8E-19	-187.5	9.1E-18	-170.4	4.7E-16	-153.3
70.00	1.8E-19	-187.5	2.2E-17	-166.6	2.8E-15	-145.6
101.00	3.2E-19	-185.0	9.7E-17	-160.9	2.1E-14	-136.8
154.00	3.2E-19	-185.0	1.8E-16	-157.2	1.1E-13	-129.4
328.00	1.8E-19	-187.5	4.9E-16	-153.1	1.3E-12	-118.7
600.00	3.5E-19	-184.4	3.2E-15	-144.8	3.0E-11	-105.2
1E+4	6.5E-16	-151.9	3.5E-14	-87.9	4.1E-03	-23.8
1E+5	4.9E-11	-103.1	1.2E-02	-19.1	2.6E+06	65.0

Otro modelo reciente, es el propuesto por Berger y Davis (2004) (Figura 4.9). En este caso los resultados corresponden a una centena de estaciones sísmicas de la Red "Global Seismological Network" (GSN). Los resultados obtenidos son similares a los propuestos por Peterson (1993); sin embargo, la diferencia es notoria para periodos mayores a 50 segundos, lo que se explica por el avance tecnológico del instrumental durante los más de 10 años de diferencia entre un estudio y el otro.

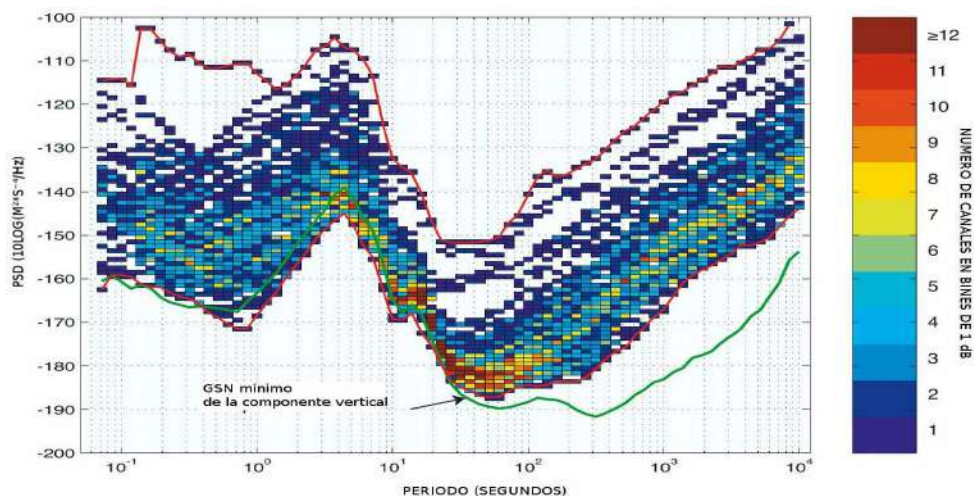


Figura 4.9: Modelo de ruido obtenido para las estaciones de la red GSN, usando solo la componente vertical de 118 estaciones (Berger y Davis, 2004).

4.4 Características y Fuentes de Ruido Sísmico

La distribución frecuencial del ruido de fondo que registra una estación sísmica, representa el umbral para el sismo de menor magnitud capaz de registrarse en una determinada estación sísmica. A continuación, se detalla las características de los diferentes tipos de ruidos que se registran en una estación sísmicas.

4.4.1 Ruido Instrumental

El ruido de fondo es la suma del ruido ambiental producido por las vibraciones del terreno (sea cual fuera su fuente) y el ruido intrínseco del instrumento. Este último, no tiene utilidad alguna y debe ser debidamente analizado y evaluado para lograr evitarlo.

En general, el ruido instrumental es generado por dos fuentes principales definidas por Riedesel et al. (1990):

- **Movimiento Browniano termal del sistema masa-resorte del sismómetro**, el cual es inversamente proporcional a la masa, y directamente proporcional al damping.
- **Ruido electrónico**, causado por las corrientes que fluyen a través de los elementos y el ruido del semiconductor.

La primera fuente de ruido instrumental puede ser ignorada, a menos que la masa sea demasiado pequeña. La segunda es más frecuente y sobre todo problemática a frecuencias bajas. La combinación de los valores de los parámetros del sensor (e.g. constante del generador, resistencia de la bobina, resistencia del damping, peso de la masa del sensor), determinaran las características espectrales y amplitudinales del ruido instrumental. En teoría se debe buscar contar con un sensor que muestre una contribución de ruido de acuerdo a las expectativas, de manera que se puedan satisfacer los umbrales de detección necesario para cumplir con los objetivos del estudio que se este realizando.

Frecuentemente, para identificar la presencia de ruido instrumental, se puede utilizar dos o más instrumentos cerca uno del otro en una misma estación, para luego realizar la correlación entre señales, de manera que la

parte coherente corresponde al ruido producido por el movimiento del terreno y la incoherente al ruido instrumental. Otro método para la determinación del ruido propio del instrumento fue propuesto por Sleeman et al. (2006), el cual consiste en definir el ruido propio como una función de la frecuencia dentro de un sistema lineal de tres canales.

Adicionalmente, el ruido instrumental estacionario tiene su origen en fallas de los semiconductores o por la desgasificación de materiales porosos (Bormann y Wielandt, 2013). Otro factor a considerar, es el tipo de instalación que se realiza, sobre todo cuando el sistema no cuenta con protección, ya que el sensor se puede ver afectado por la variabilidad de los factores ambientales.

4.4.2 Microsismos Oceánicos

A inicios de la etapa instrumental en sismología (finales del siglo XIX), los sismógrafos ya eran capaces de registrar una anomalía peculiar que siempre se presentaba a lo largo de la banda frecuencial de 4-20 s, este era y será la constituyente frecuencial eterna del ruido de fondo para cualquier medición sísmica. Desde entonces se han venido realizando investigaciones que trataban de explicar este fenómeno (Algue, 1900). Finalmente, se concluyó que la fuente era la dinámica de las olas en los océanos y hoy en día, con el desarrollo instrumental, se ha logrado obtener información que ha permitido clasificarlos en:

- Microsismos oceánicos primarios, 10–20 s
- Microsismos secundarios , 10–4 s

Para comprender cada clasificación, es necesario entender primero la dinámica de los diferentes tipos de olas que se pueden generar en los océanos. En la Figura 4.10 se presenta los diferentes tipos de olas y su espectro frecuencial, y cuya variabilidad se debe a factores como el viento, la atracción gravitatoria del sol y la luna, y los sismos en la superficie de las placas oceánicas.

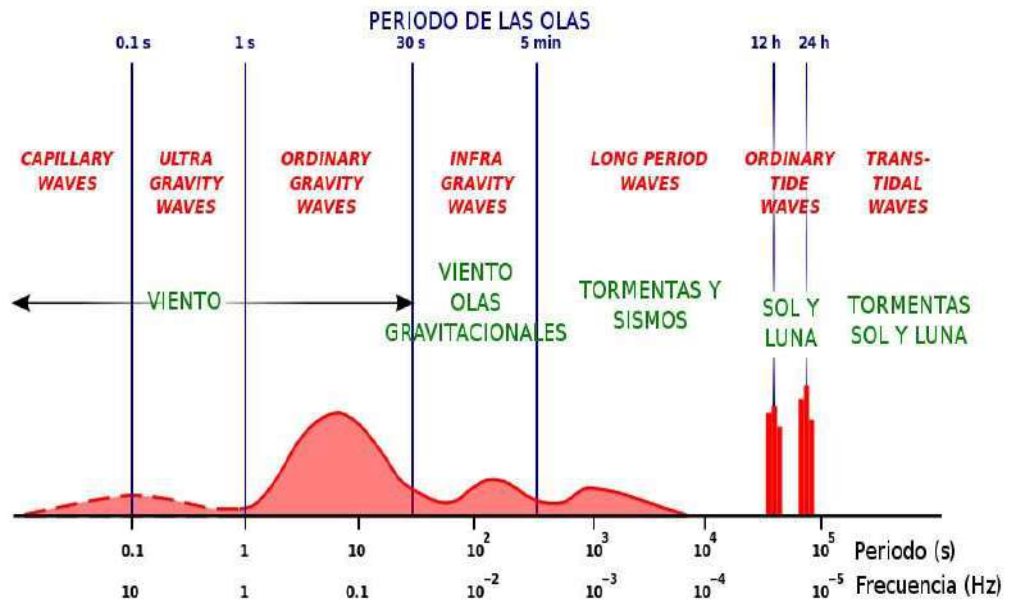


Figura 4.10: Clasificación de olas oceánicas según su periodo (Munk, 1950)

Los microsismos oceánicos primarios, son generados por aguas superficiales en regiones costeras. Este ruido tiene su origen en la energía de las olas provocadas por las variaciones de presión y por los impactos en las orillas.

Las ondas microsísmicas secundarias, las cuales tienen sus picos máximos en periodos de 5 a 8 segundos y se originan por la interferencia constructiva de dos trenes de olas en el mar que viajan con direcciones opuestas y que al chocar se convierten en estacionarias (modos normales) y con sus periodos reducidos a la mitad. Estas ondas estacionarias causan perturbaciones no lineales de la presión que se propagan sin atenuarse hasta el fondo del océano, donde se acoplan como ondas elásticas de longitud de onda mucho más larga.

La Figura 4.11a muestra la generación de microsismos primarios debido a las variaciones laterales de presión y la Figura 4.11b, la generación de microsismos secundarios en el área de interferencia X, que en este caso está en la zona de "offshore" donde las ondas que se propagan, generadas por una área de baja presión L, se superponen con las ondas de sentido contrario que regresan luego de haber interactuado con la costa.

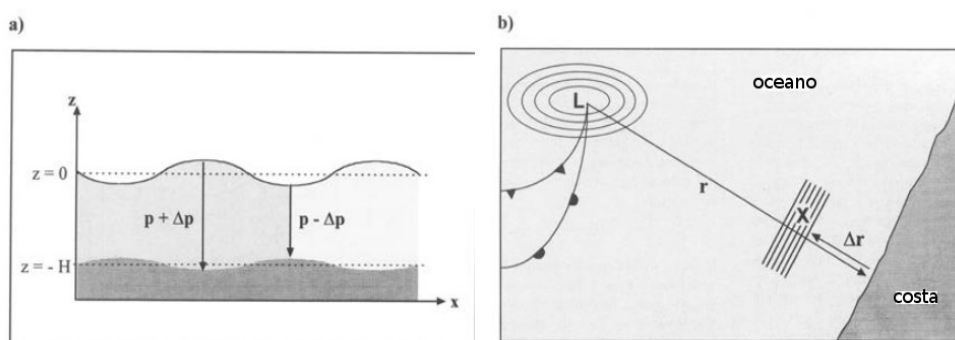


Figura 4.11: Esquema de la generación de microsismos primarios y secundarios. L-área de baja presión, X-área de interferencia donde se desarrollan las ondas estacionarias. (Fiedrich et al., 1998)

4.4.3 Ruido Sísmico de Periodo Largo

Este ruido comprende periodos entre 20 a 5000 s, y usualmente esta asociado a las fluctuaciones de la presión atmosférica (Sorrels, 1971). Para los periodos mas altos (>500 s), la componente vertical reacciona a los cambios de la gravedad, a medida que la masa de atmósfera que se encuentra por encima cambia en relación a los cambios de presión atmosférica (Zürn y Widmer, 1995). Para periodos mas bajos (20-200 s), el ruido es producto de la deformación del terreno bajo las fluctuaciones de presión asociadas con la turbulencia en la capa limite de la atmósfera (Murphy y Savino, 1975). Adicionalmente, si los sismómetros no están correctamente sellados, puede que experimenten una aparente aceleración debido a efectos de la masa y de la temperatura, o que las fluctuaciones de la presión causen ruido de periodo largo en la componente horizontal al afectar al sismómetro o a las paredes de la válvula (Savino et al., 1972). Para evitar este ruido, se debe realizar la correcta instalación del sensor y de la estación sísmica.

La Figura 4.12 muestra una traza sísmica junto con los registros correspondientes de presión atmosférica, a partir de esos dos registros se realiza su correlación obteniendo así la coherencia de estas dos señales. Seguidamente, esta coherencia es suprimida del registro sísmico, eliminando así el efecto causado por la presión atmosférica. Luego de este proceso, se puede notar claramente en el registro sísmico corregido la presencia de dos eventos sísmicos que no se podían detectar antes.

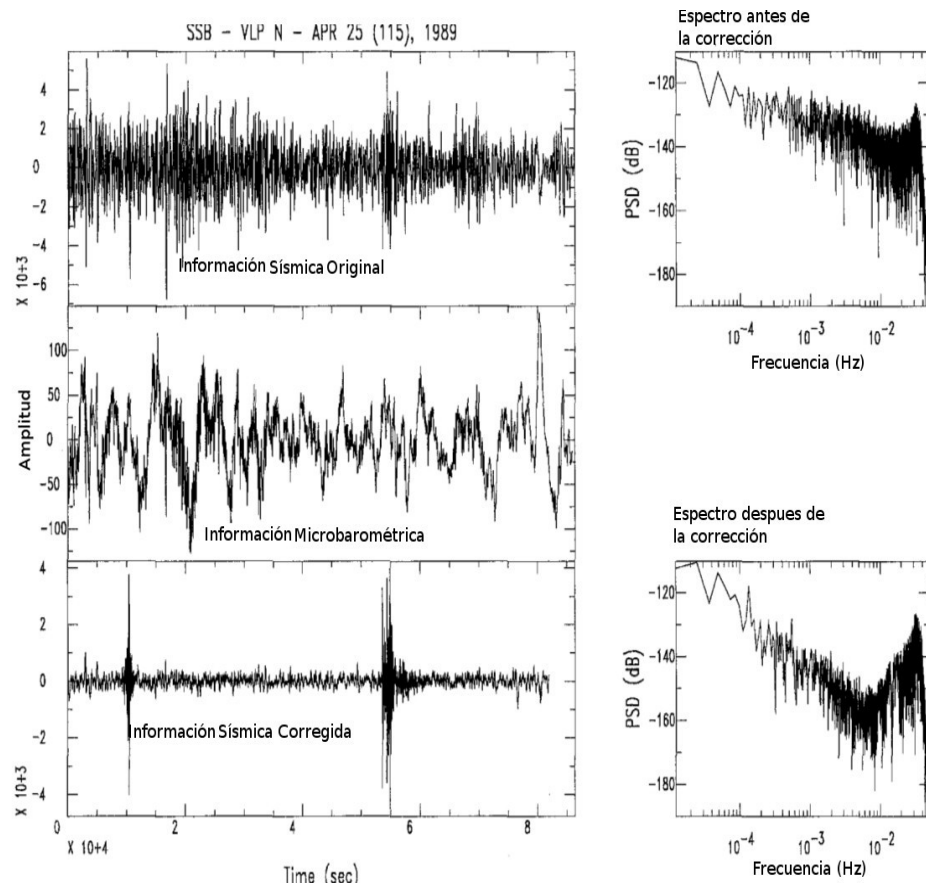


Figura 4.12: Corrección por efectos atmosféricos (Beaudin et al., 1996)

En general, es común encontrarse con el caso de una estación sísmica que presentan ruido en la banda 100-300 s que es mucho más alto (20 dB) en las componentes horizontales que en la componente vertical (ver Figura 4.13). Para evitar registrar esta fuente de ruido, los sismómetros de banda ancha son instalados de preferencia bajo la superficie de la Tierra, ya sea en una perforación o en una mina subterránea (Sorrells et al., 1971). En estas condiciones, se elimina también los efectos de la variación de la temperatura.

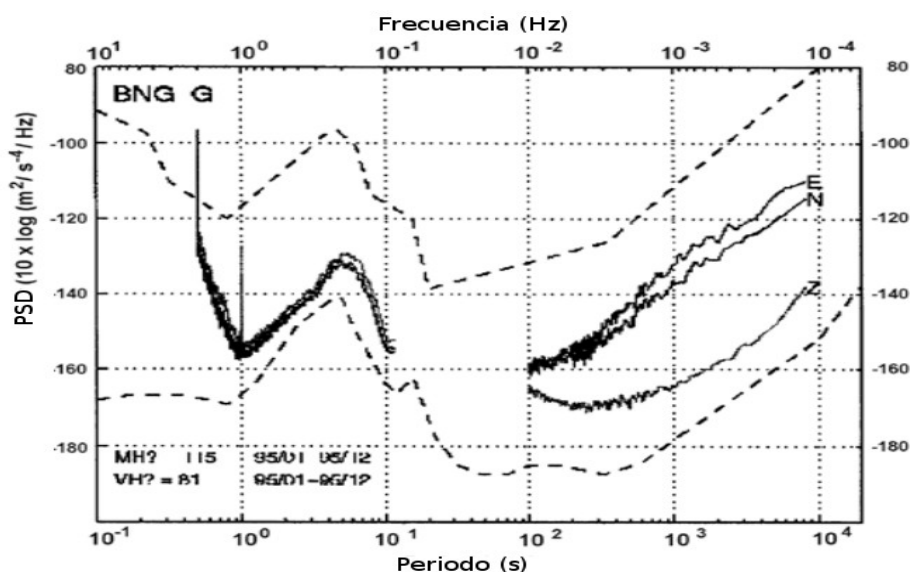


Figura 4.13: Ruido sísmico para las 3 componentes de una estación. La imagen muestra la mayor cantidad de ruido presente en las componentes horizontales.

4.4.4 Ruido Sísmico de Periodo Corto

Este ruido comprende los periodos por debajo de los 2 s. Algunas de sus fuentes son naturales, como el viento (que al pasar por una superficie roza con ella causando fricción y por lo tanto movimiento, o al pasar por árboles, la vegetación o construcciones haciéndolos vibrar según sus respectivas frecuencias fundamentales) y el agua (e.g. movimiento del agua de ríos).

El ruido generado por el viento tiene un amplio ancho de banda, que va de 2 s a 0.015 s, siendo no lineal, ya que se ve incrementado dramáticamente luego de que se exceden ciertos umbrales de velocidad (3 a 4 m/s) (Young et al., 1996). Sin embargo, la otra fuente dominante en estos rangos frecuenciales es definitivamente el ruido producido por el hombre (plantas de energía, factorías, maquinaria, tráfico de vehículos o trenes, etc), que también es conocido como *ruido cultural*. En el caso del ruido generado por el viento, este se acopla con el terreno formando, en su mayoría, ondas superficiales. En el caso del ruido cultural, este se transfiere al suelo en forma de ondas de cuerpo, las que se propagan a profundidades mayores con mucho más facilidad. Carter et al. (1991) sostiene que el nivel de ruido generado por efectos del viento decae rápidamente con respecto a la profundidad a la cual fue instalado el sensor. Según Young et al. (1996), decae de 10 hasta 30 dB en los primeros 100 metros. En el caso del ruido cultural, es notoria su

variación en ciclos semidiarios y diarios, tal como se muestra en la Figura 4.14. En este caso, es común en los estudios de ruido sísmico comparar los espectros frecuenciales durante periodos semanales en el tiempo para buscar ciclicidades (ver Figura 4.15).

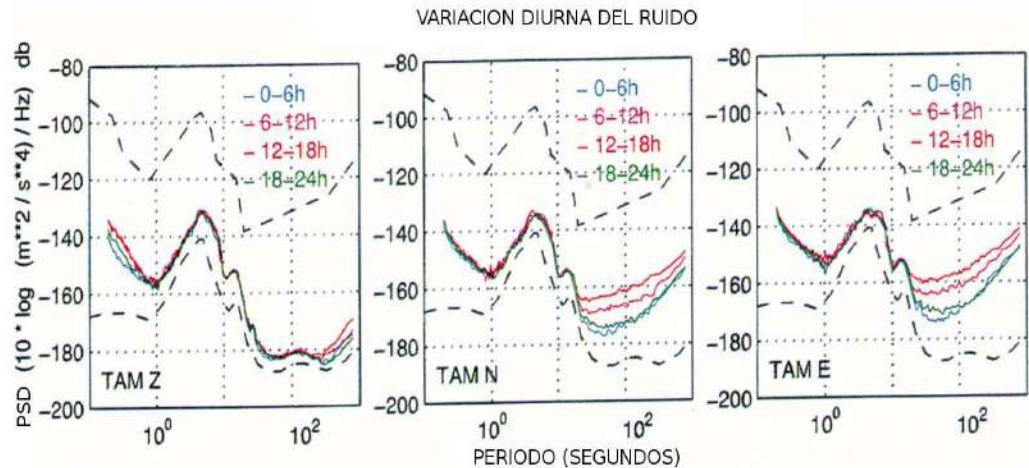


Figura 4.14: Variación diaria del ruido sísmico (Stutzmann et al., 2000).

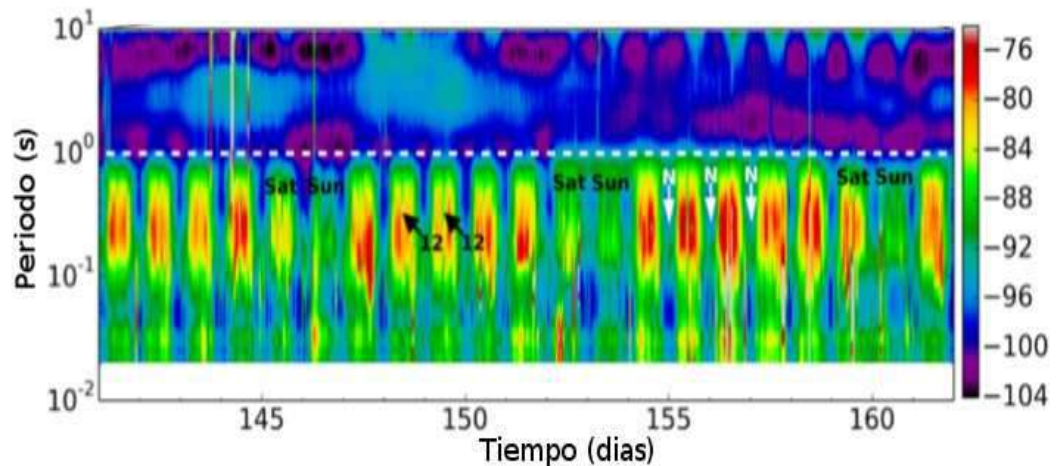


Figura 4.15: Espectrograma del ruido de la componente vertical. Para los periodos de 10 a 10^{-1} s se ve que los niveles de ruido más bajos se dan en días Sábado y Domingo y los más altos para los días de semana. (Lehujeur et al., 2015).

A primera vista, el ruido cultural puede ser evitado, al instalar la estación en lugares alejados de las poblaciones, lastimosamente, el problema se denota al considerar lo impráctico que sería tratar de instalar una estación sísmica en un lugar remoto. De la misma forma, se sacrifica otros factores logísticos y de seguridad, por ello la importancia de conocer el suelo.

Muchos autores han propuestos diversos criterios para reducir los niveles de ruido en cada estación sísmica (ver 4.3), pero puestos en práctica no son tan eficientes, ya que dependerá de las condiciones que presente cada país. Tal es el caso del acceso fácil y de la seguridad de la infraestructura en la cual se instaló la estación, además del costo de la misma estación. Por ello, los niveles de ruido sísmico se han incrementado considerablemente.

Tabla 4.3 Recomendaciones mínimas para la instalación de una estación sísmica. (Wilmore, 1979)

COORDENADAS N 18° 46' 58.4" W 70° 13' 20.1"		ROCA MACIZA GRANITO, ETC			SUELOS			
		DISTANCIAS MINIMAS RECOMENDADAS [KM]						
		A	B	C	A	B	C	
1. Océanos, sistemas de montañas de la costa		300	50	1	300	50	1	
2. Grandes lagos		150	25	1	150	25	1	
3. Grandes represas, cataratas		a	40	10	1	150	25	5
		b	60	15	5	50	15	10
4. Grandes tuberías petroleras		a	20	10	5	30	15	5
		b	100	30	10	100	30	10
5. Pequeños lagos		a	20	10	1	20	10	1
		b	50	15	1	50	15	1
6. Maquinaria pesada		a	15	3	1	20	5	2
		b	25	5	2	40	15	3
7. Cataratas pequeñas, rápidos de ríos		a	5	2	0.1	15	5	1
		b	15	3	1	25	8	2
8. Vías ferreas		a	6	3	1	10	5	1
		b	15	5	1	20	10	1
9. Aeropuertos, tráfico aéreo		6	3	1	6	3	1	
10. Maquinaria industrial		a	2	0.5	0.1	10	4	1
		b	4	1	0.2	15	6	1
11. Autopista de alto tráfico		1	0.3	0.1	6	1	0.5	
12. Carreteras, edificios altos		0.3	0.2	0.05	2	1	0.5	
13. Edificios bajos		0.1	0.03	0.01	0.1	0.1	0.05	
14. Árboles bajos, arbustos altos, grandes rocas		0.05	0.02	0.005	0.06	0.03	0.01	

Leyenda

A - Estaciones sísmicas con ganancia de 200,000 a más, para 1 Hz.

B - Estaciones sísmicas con ganancia de 50,000 a 150,000, para 1 Hz.

C - Estaciones sísmicas con ganancia de aproximadamente 25,000, para 1 Hz

a – Fuente y sismómetro en diferentes formaciones o con presencia de valles o montañas entre ellos.

b- Fuente y sismómetro en una misma formación y sin valles o montañas entre ellos.

CAPÍTULO V METODOLOGÍA

5.1 Generalidades

El presente capítulo especifica el procedimiento seguido en la presente investigación para realizar la evaluación de los niveles de ruido sísmico de fondo en una estación sísmica. Esta metodología utiliza los algoritmos aplicados por Peterson (1993) y McNamara y Buland (2004). La Figura 5.1 muestra el diagrama de flujo del procedimiento seguido.

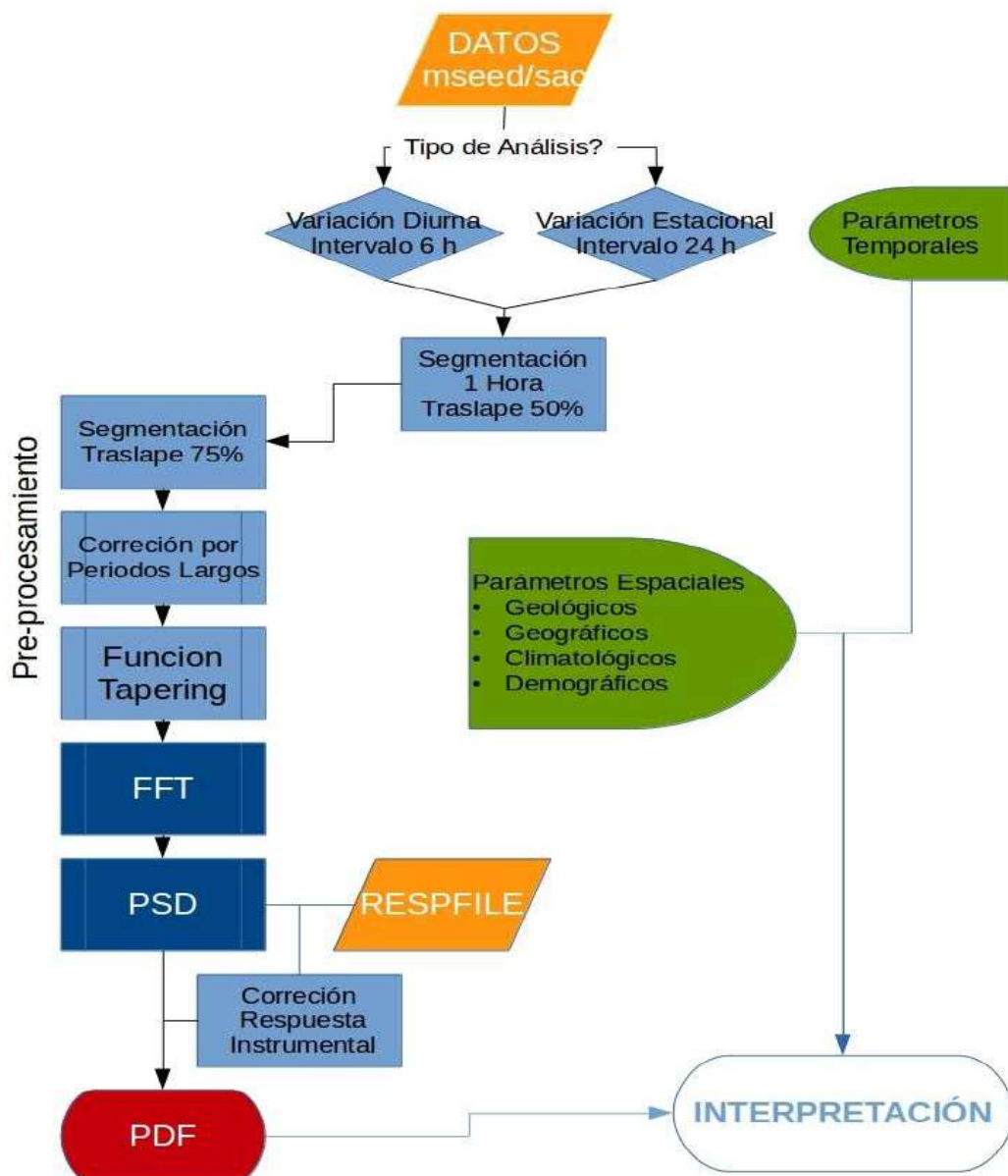


Figura 5.1: Diagrama de Flujo de la Metodología Aplicada

5.2 Selección de Parámetros Temporales

Fundamentalmente, se busca definir si los niveles de ruido sísmico son adecuados en una estación a lo largo de todo su tiempo de funcionamiento. Por lo tanto, es necesario encontrar los valores críticos de estos niveles. Para esto, se debe realizar el análisis en función al tiempo, el cual busca determinar como las variables temporales influyen sobre los niveles del ruido sísmico.

5.2.1 Análisis de Variación Diurna

Para determinar como los niveles de ruido de sísmico fluctúan en un intervalo diario, primero, se selecciona registros de la semana del año 2015 que presente menor actividad sísmica. Seguidamente, se seleccionan los registros sísmicos de los días más representativos de esta semana. Después, estos registros son agrupados en intervalos de 6 horas para poder diferenciar entre periodos nocturnos y diurnos. Finalmente, se continua con el procesamiento de estos intervalos, según el procedimiento detallado en la sección 5.3.

5.2.2 Análisis de Variación Estacional

Para determinar el comportamiento de los niveles de ruido sísmico con respecto a los cambios estacionales, se seleccionan 24 horas de registro correspondientes al comienzo del verano y del invierno austral. Seguidamente, estos registros son procesados de acuerdo al procedimiento detallado en la sección 5.3. En algunos casos, las comparaciones se realizan utilizando días de primavera y/o otoño.

5.3 Procesamiento

Independientemente del tipo de análisis temporal que se este realizando (Sección 5.2), todos los registros son evaluados de acuerdo al siguiente procedimiento.

5.3.1 Formatos de Entrada

Los sismogramas utilizados para la evaluación de ruido sísmico puede ser presentados en los siguientes formatos:

- mini-SEED

- SAC
- SEGY
- AH
- DR100
- NANO

Para la distribución de datos sísmicos, el Instituto Geofísico del Perú utiliza el formato mini-SEED, los que contienen para un intervalo de tiempo determinado los registros de todas las componentes (BHE, BHN y BHZ) de la estación en un solo archivo. Sin embargo, es recomendable generar archivos mini-SEED o SAC que contengan tan solo un canal por archivo, de modo que sea fácil su procesamiento.

Adicionalmente para cada estación sísmica es necesario conocer la respuesta del instrumento o "función transferencia", para obtener así la representación real del comportamiento del terreno. Esta función de transferencia es propia de cada equipo y puede ser presentada en diferentes formatos, de los cuales los más utilizados son los siguientes:

- SACPOLEZERO
- DATALESS SEED
- RESPFILE

Las estaciones sísmicas de la Red Sísmica Satelital a cargo del Instituto Geofísico del Perú cuentan con sus respectivos archivos de respuesta en formato RESPFILE, y serán utilizados posteriormente por la librería 'evalresp', para remover la respuesta instrumental.

La Figura 5.2 muestra el archivo de respuesta para la componente BHE de la estación ANDY. Estos archivos son generados utilizando el paquete PDCC, y llegan a contener los parámetros del sensor y del registrador. Cada componente de registro requiere un archivo RESPFILE, el cual será utilizado en la sección 5.3.4.3.

```

#          << IRIS SEED Reader, Release 5.3 >>
#
#          ===== CHANNEL RESPONSE DATA =====
B050F03  Station:  ANDY
B050F16  Network:  PE
B052F03  Location:  ??
B052F04  Channel:  BHE
B052F22  Start date: 2015,000,00:00:00.0000
B052F23  End date:   No Ending Time
#
#          =====
#          +          +-----+
#          +          | Response (Poles & Zeros), ANDY ch BHE |
#          +          +-----+
#
B053F03  Transfer function type:  A [Laplace Transform (Rad/sec)]
B053F04  Stage sequence number:  1
B053F05  Response in units lookup:  M/S - Velocity in Meters Per Second
B053F06  Response out units lookup: V - Volts
B053F07  A0 normalization factor:  4.34493E+17
B053F08  Normalization frequency:  1
B053F09  Number of zeroes:         6
B053F14  Number of poles:         11
#          Complex zeroes:
#          i real          imag          real_error  imag_error
B053F10-13  0  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00
B053F10-13  1  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00
B053F10-13  2 -3.920000E+02  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00
B053F10-13  3 -1.960000E+03  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00
B053F10-13  4 -1.490000E+03  1.740000E+03  0.000000E+00  0.000000E+00
B053F10-13  5 -1.490000E+03 -1.740000E+03  0.000000E+00  0.000000E+00
#          Complex poles:
#          i real          imag          real_error  imag_error
B053F15-18  0 -3.691000E-02  3.702000E-02  0.000000E+00  0.000000E+00
B053F15-18  1  3.702000E-02  -3.691000E-02  0.000000E+00  0.000000E+00

```

Figura 5.2: RESPFILE, componente BHE de la estación ANDY.

5.3.2 Organización de la Información

La información de las trazas sísmicas es distribuida, como se menciona en la Sección 5.3.1, en formato mini-SEED, la mayoría registra la velocidad del desplazamiento del terreno con una tasa de muestreo de 50mps . En este estudio, los registros son agrupados en intervalos de tiempo definidos por el tipo de análisis que se vaya a realizar (24 horas para el análisis estacional y 6 horas para el análisis diurno).

A su vez, esta información es dividida en segmentos finitos de una hora $T_h=3600s$, con un traslape de 50 % (ver Figura 5.3). Este traslape es aplicado a fin de reducir efectivamente la varianza en las estimaciones de los PSD (Cooley y Tukey, 1995). Los nuevos segmentos contarán con un número de muestras de $N=180,000$ muestras .

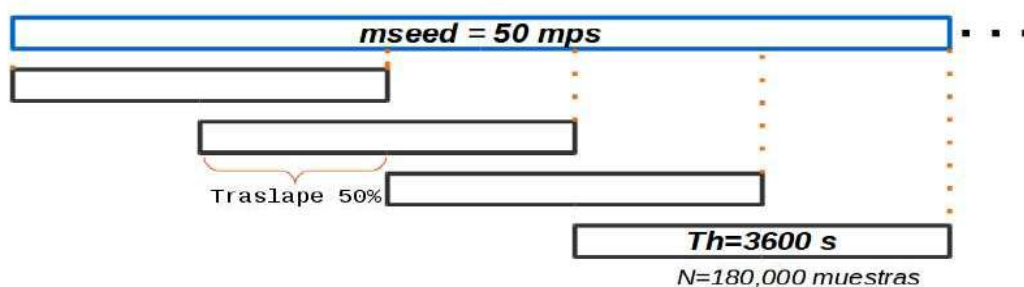


Figura 5.3: Organización de la información

5.3.3 Pre-procesamiento

5.3.3.1 Segmentación de la Información

Una nueva segmentación de la información es realizada con el objetivo de mejorar el tiempo de procesamiento usando la Transformada Rápida de Fourier.

Primero, las trazas de una hora de longitud son truncadas a la potencia de 2 inferior más cercana. Las 180,000 *muestras* iniciales son entonces reducidas a segmentos con longitudes de $N=131,072=2^{17}$, lo que equivale a un tiempo de muestreo de $T_h=2621,44 \text{ s}$. Hay una evidente pérdida de datos, sin embargo esto es compensado por el traslape aplicado en el apartado 5.3.2.

Luego, se divide por segunda vez los segmentos en 13 partes, con un overlap del 75%. Lo que resulta en un número de muestras $N=32,768=2^{15}$, y con tiempos de $T_r=655,36 \text{ s}$ (ver Figura 5.4).

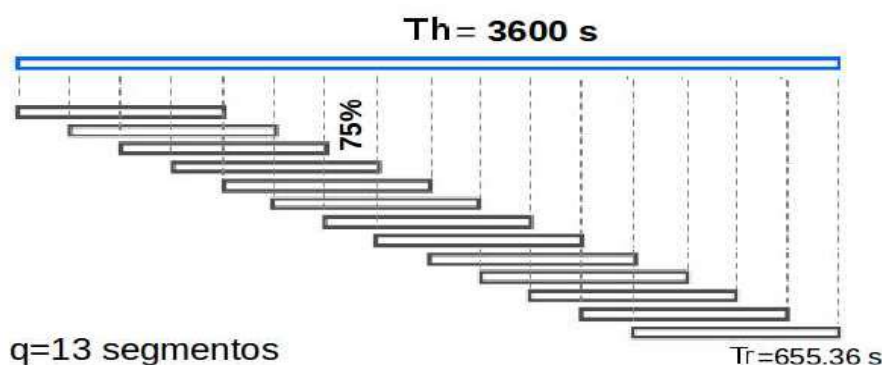


Figura 5.4: Segmentación de trazas sísmicas, con traslape de 75%.

Es importante considerar que la longitud de la muestra T_r , debe ser elegida de tal manera que sea 10 veces el periodo más largo de interés T_l y en este caso se considera 65s. El periodo más corto T_s , se define en la Ec. 5.1, donde f_h es la frecuencia de muestreo y f_c la frecuencia de Nyquist. Estas consideraciones delimitan los rangos de interés, representado en la Figura 5.5. (frecuencia de muestreo, f_h)

$$\begin{aligned} f_c &= \frac{1}{2} \cdot f_h = 25 \text{ Hz} \\ T_s &= 1/f_c = 0.04 \text{ s} \end{aligned} \quad (5.1)$$

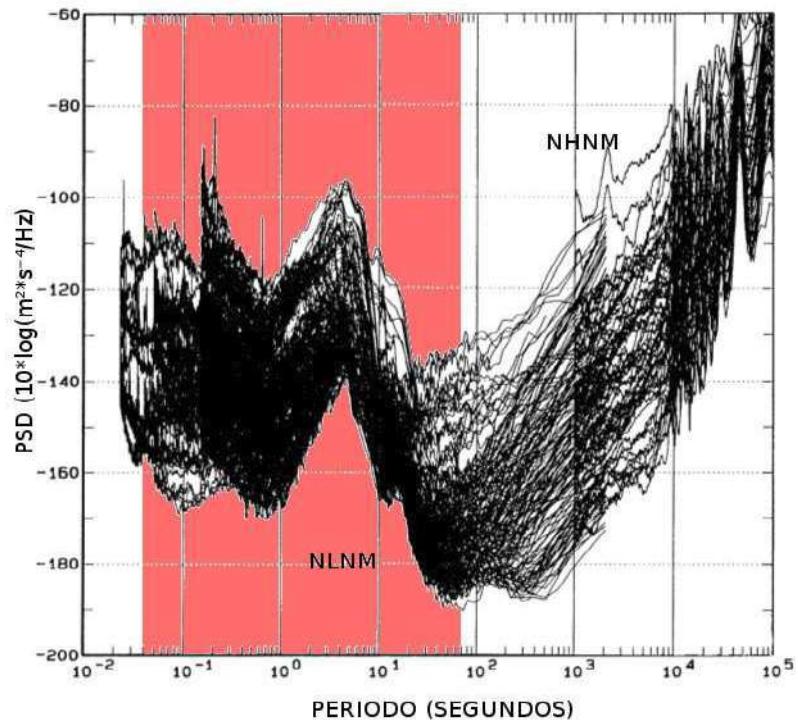


Figura 5.5: Rango frecuencial de interés.

5.3.3.2 Corrección de Periodos Largos

Para reducir la contaminación de periodos largos, la información es transformada a valores medios de cero, de modo que cualquier tendencia lineal de periodo largo es removida mediante el método de pendiente media.

Se define u_n como los valores de la serie $u(t)$ de longitud T_r , y con N muestras. Entonces la media esta dada por:

$$u_{media} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n \quad (5.2)$$

Se considera como tendencia de periodo largo T_{lp} a cualquier componente frecuencial cuyo periodo es mayor a la longitud de registro, T_r , y es definido como:

$$T_{lp} = \alpha_u \left(t - \frac{T_r}{2} \right) \quad (5.3)$$

Donde $0 \leq t \leq T$, y

$$\alpha_u = \frac{1}{\left(\frac{T_r}{3}\right)\left(\frac{2T_r}{3}\right)} \left[\int_{\frac{2T_r}{3}}^{T_r} u(t) dt - \int_0^{\frac{T_r}{3}} u(t) dt \right] \quad (5.4)$$

Si esta eliminación no se realiza, el procesamiento espectral podría sufrir distorsiones que pueden nulificar las estimaciones de los periodos largos.

Substrayendo (5.2) y (5.3) de la función original $u(t)$, se obtiene un nueva serie de tiempo $x(t)$ con las correcciones aplicadas.

$$x(t) = u(t) - u_{media} - T_{lp} \quad (5.5)$$

5.3.3.3 Aplicación de la Función Tapering

El último paso del pre-procesamiento consiste en la supresión del comúnmente llamado "manchado frecuencial" que se produce al utilizar la Transformada Rápida de Fourier sobre un intervalo de tiempo en el cual las fases del comienzo y fin de las diferentes sinusoidales no coinciden (ver Figura 5.6).

Para evitar este problema, se suaviza el comienzo y el fin del registro mediante la utilización de una función tapering.

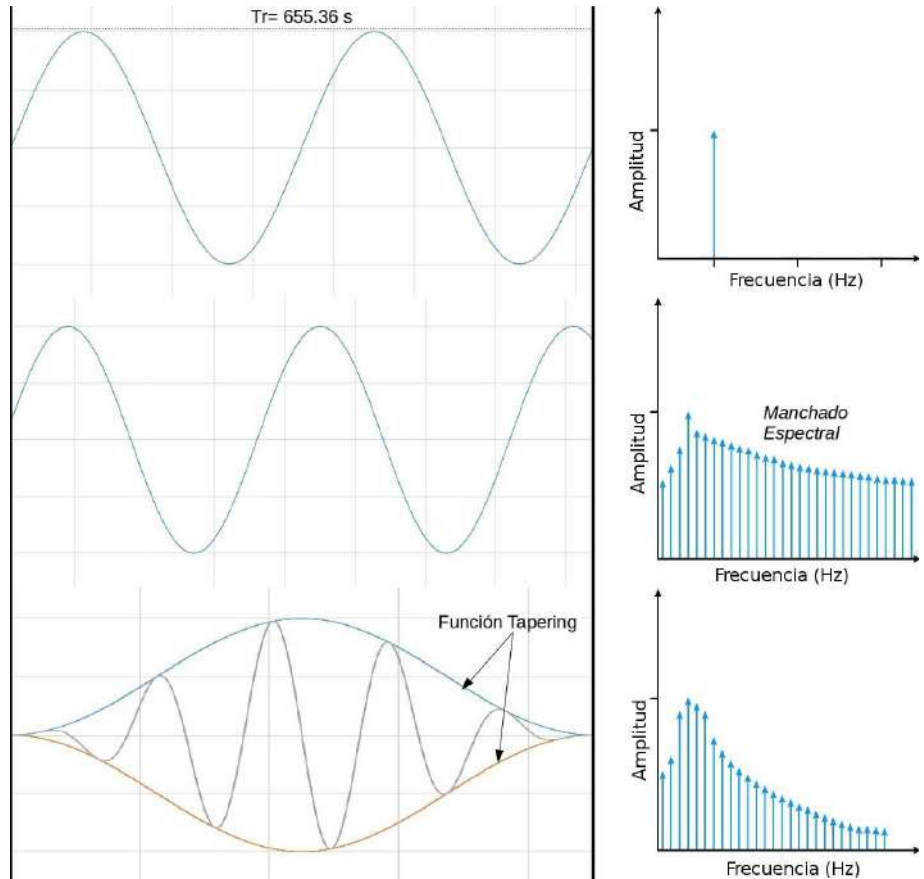


Figura 5.6: Manchado espectral a causa de la Transformación Rápida de Fourier y aplicación de función Tapering.

En este estudio se aplica un taper sinusoidal al 10%, tanto al comienzo y al final de la serie de tiempo, $x(t)$; Se define una nueva serie de tiempo $y(t)$ según la Ec. (5.6).

$$\begin{aligned}
 y(t) &= x(t) * \sin\left(\frac{\pi}{2} * \frac{t}{T_r/10}\right) & 0 \leq t \leq T_r/10 \\
 y(t) &= x(t) & T_r/10 \leq t \leq T_r - T_r/10 \\
 y(t) &= x(t) * \sin\left(\frac{\pi}{2} * \frac{T_r - t}{T_r/10}\right) & (T_r - T_r/10) \leq t \leq T_r
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Este proceso, ayuda con la suavización de la Transformada Rápida de Fourier y con la minimización del efecto de la discontinuidad

entre el final y comienzo de otra serie contigua. La disminución de las series de tiempo puede ser cuantificada por la razón entre el poder de la FFT cruda y el poder de la FFT suavizada. Este factor (1.142857) será utilizado en futuros pasos para corregir el poder absoluto en el espectro final (Bendat y Piersol, 1971).

5.3.4 Densidad Espectral de Potencia

Por convención, en la mayoría de las publicaciones el ruido sísmico es representado y evaluado siguiendo la técnica de Densidad Espectral de Potencia con respecto a la aceleración (las razones fueron detalladas en la sección 4.2.2.4)

5.3.4.1 Transformada Discreta de Fourier

Hasta este momento se tiene una serie de tiempo $y(t)$, la cual es utilizada como entrada para la obtención de su respectiva Transformada de Fourier. Este proceso es llevado a cabo con el paquete FFTW desarrollado por Matteo Frigo y Steven G. Johnson.

A partir de la Ec. (5.6) Se obtiene la transformada de Fourier de rango finito.

$$Y(f,t) = \int_0^{T_r} y(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (5.7)$$

Donde el número de estimaciones de la amplitud frecuencial es $nfft = (N/2) = 16384$ (ver 5.1). Para valores de frecuencia discretizados f_k , las componentes de Fourier son definidas como:

$$Y_k = Y \frac{(f_k, n)}{\Delta t} = \sum_{n=1}^N y_n * e^{-i2\pi f_k n} * fs \quad (5.8)$$

Para, $f_k = k / (N \cdot \Delta t)$ cuando $k = 1, 2, \dots, nfft$

Tabla 5.1: Pares f-k para $ntff=16384$, $fs=50$ mps

k	fk (Hz)	pk (s)
16384	25.0000000	0.0400000
16383	24.9984741	0.0400024
16382	24.9969482	0.0400049
16381	24.9954224	0.0400073
16380	24.9938965	0.0400098
16379	24.9923706	0.0400122
16378	24.9908447	0.0400147
	▪	
	▪	
	▪	
7	0.0106812	93.6228571
6	0.0091553	109.2266667
5	0.0076294	131.0720000
4	0.0061035	163.8400000
3	0.0045776	218.4533333
2	0.0030518	327.6800000
1	0.0015259	655.3600000

5.3.4.2 Densidad Espectral de Potencia

De acuerdo a la Ec. (4.6), y tomando las componentes frecuenciales determinadas en la Ec. (5.8), se determina la densidad espectral.

$$P_k = \frac{\Delta t}{N} |Y_k|^2 \quad (5.9)$$

Este proceso es repetido a los 13 segmentos definidos en la sección 5.3.3.1, luego se promedia los 13 factores, donde cada uno tiene una longitud de T_r . Finalmente, el PSD suavizado es definido por:

$$P_k = \frac{1}{q} (P_{k,1} + P_{k,2} + \dots + P_{k,q}) \quad (5.10)$$

Donde $P_{k,q}$ es la estimación de la componente de Fourier para una frecuencia f_k del q-ésimo segmento.

Luego, se compensa la amplitud perdida en la sección 5.3.3.3 (Tapering), multiplicando por el factor del filtro de suavizado.

$$P_k = P_k * 1.142857 \quad (5.11)$$

5.3.4.3 Corrección de la Respuesta Instrumental

Ya que las señales provistas representa la respuesta del instrumento ante un movimiento del terreno, y no el movimiento en si. Es necesario deconvolucionar el efecto instrumental de manera que se tenga la representación real del desplazamiento, velocidad o aceleración del terreno.

Este proceso se realiza mediante el paquete 'evalresp', el mismo que interpreta los archivos de respuesta descritos en la Sección 5.3.1, y produce los diagramas de Bode con respecto al parámetro que se le solicite (desplazamiento, velocidad o aceleración). La Figura 5.7 muestra la respuesta amplitudinal de la componente BHE de la estación ALTO con respecto a la velocidad y aceleración. La metodología seguida hace uso de la respuesta con respecto a la aceleración.

Seguidamente, se deconvoluciona la respuesta del instrumento al dividir los valores P_k resultante de la sección 5.3.4.2, por el valor amplitudinal correspondiente de la función de transferencia.

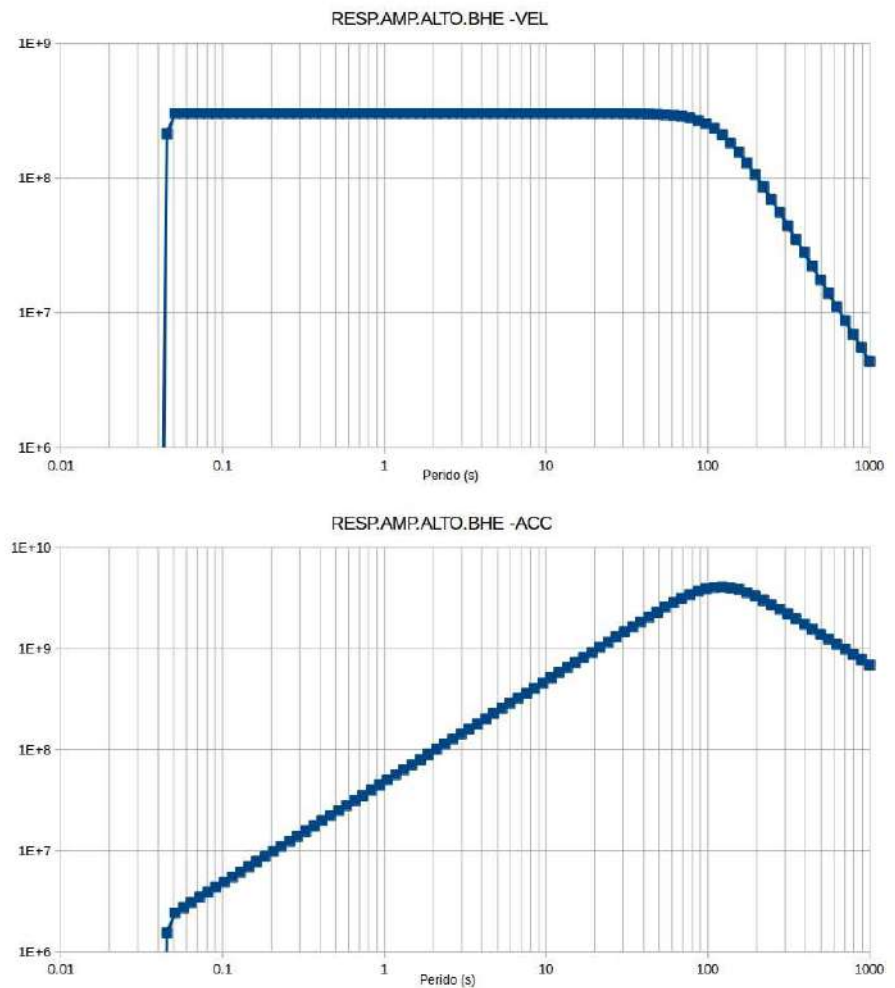


Figura 5.7: Respuesta instrumental de la estación ALTO, componente BHE. Arriba, con respecto a la velocidad. Abajo, con respecto a la aceleración.

5.3.4.4 Representación

El resultado de la sección anterior, se convierte a decibelios (dB) con respecto a la aceleración $(m/s^2)^2/Hz$, con el objetivo de que se pueda comparar directamente con las curvas propuestas por Peterson (1993).

$$P_k = 20 * \log_{10}(P_k) \quad (5.12)$$

5.3.5 Función Probabilidad de la Densidad

Para visualizar verdaderamente como varía el ruido sísmico, en el presente trabajo se utiliza la Función Probabilidad de la Densidad, siendo la manera más

versátil y eficaz de mostrar la variabilidad del ruido sísmico. Para esto, se toma el resultado final de la sección 5.3.4 y se genera a partir de ellos, los PDFs correspondientes, según el procedimiento detallado a continuación.

5.3.5.1 Reducción de Componentes Frecuenciales

Primero, se minimiza el número de frecuencias (anteriormente $nfft=16,384$). tomando intervalos de $1/8$ de una octava, de manera que el poder, dentro de ese intervalo, corresponde a una frecuencia central T_c , la cual representa las frecuencias esquina superior e inferior (T_s y T_i)(Figura 5.8a). La relación entre las tres frecuencias es representada por la media geométrica:

$$T_c = \sqrt{T_s * T_i} \quad (5.13)$$

La geometría de estos intervalos permite que la representación sea equidistante cuando se utiliza una escala logarítmica (Figura 5.8b).

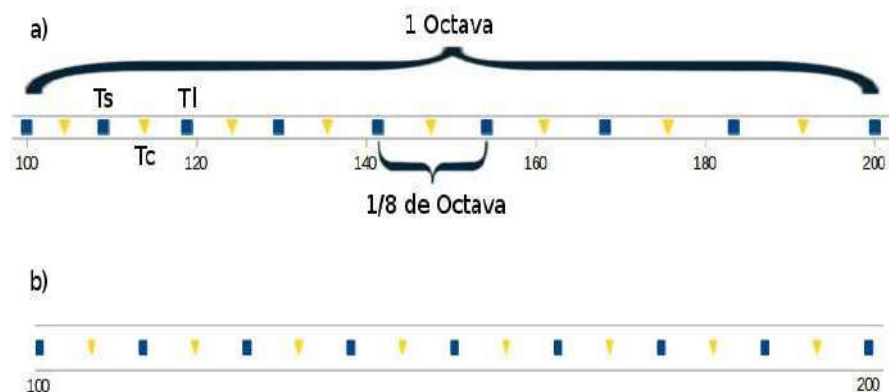


Figura 5.8: Representación de los intervalos en 1/8 de octava. a) con escala decimal. b) con escala logarítmica.

El poder se promedia para el rango de periodo (de T_s a T_i) y se guarda con respecto a su frecuencia central (T_c) para luego ser utilizado en el análisis. Seguidamente, el valor de T_s se incrementa por $1/8$ de octava, de manera que $T_s = T_s * 2^{0.125}$, para calcular el

poder del siguiente bin. Se procede de esta manera hasta alcanzar el periodo más largo que pueda ser resuelto (ver sección 5.3.3.1).

Así, el número de periodos es reducido a 98 (ver 5.2). Este procedimiento se repite para todos los segmentos T_h que se analicen.

Tabla 5.2: Intervalos discretizados finales

# Intervalo	Tc	Ti	Ts	Cuenta
1	0.040000	0.038304	0.041771	695
2	0.043620	0.041771	0.045552	1302
3	0.047568	0.045551	0.049674	1194
4	0.051874	0.049675	0.054171	1095
5	0.056569	0.054171	0.059074	1005
6	0.061688	0.059073	0.064419	921
7	0.067272	0.064420	0.070250	845
8	0.073360	0.070250	0.076608	774
9	0.080000	0.076608	0.083542	710
10	0.087241	0.083542	0.091103	651
		■		
		■		
		■		
80	37.560486	35.968045	39.223431	2
81	40.959999	39.223429	42.773453	1
82	44.667194	42.773452	46.644780	1
83	48.709923	46.644782	50.866496	2
84	53.118546	50.866494	55.470305	1
85	57.926186	55.470306	60.490797	1
86	63.168953	60.490797	65.965681	1
87	68.886230	65.965680	71.936084	0
88	75.120972	71.936089	78.446862	1
89	81.919998	78.446859	85.546906	1
90	89.334389	85.546904	93.289560	0
91	97.419846	93.289564	101.732991	1
92	106.237091	101.732987	110.940609	1
93	115.852371	110.940611	120.981594	0
94	126.337906	120.981593	131.931363	1
95	137.772461	131.931361	143.872169	0
96	150.241943	143.872178	156.893722	0
97	163.839996	156.893718	171.093812	1
98	178.668777	171.093807	186.579120	0

5.3.5.2 Determinación de Probabilidad Espectral

Para la generación de los PDF, se juntan todos los PSD correspondientes al intervalo de tiempo que se este analizando. Luego, los periodos son acumulados en intervalos de un decibelio para

producir histogramas que represente la distribución de las frecuencias con respecto a los poderes que estas presenten.

Seguidamente, se determina la probabilidad de ocurrencia que tiene un bin de poder para un determinado bin frecuencial, según:

$$P(T_c) = N_{PTc} / N_{Tc} \quad (5.14)$$

Donde N_{Tc} es el total de PSD, y N_{PTc} es el número de ocurrencias espectrales que caen dentro de los bins de 1Db de poder (5.3). Finalmente, se gráfica la probabilidad de ocurrencia de cada poder con respecto a cada frecuencia, para que luego se comparen con los modelos de ruido propuestos por Peterson, (1993).

Tabla 5.3: Información necesaria para la generación de PDFs.

Periodo	Poder	Ocurrencias	Prob
0.04	-50	335	46.27%
0.04	-51	22	3.04%
0.04	-52	357	49.31%
0.04	-53	10	1.38%
0.04362	-50	310	42.82%
0.04362	-51	27	3.73%
0.04362	-52	25	3.45%
0.04362	-53	362	50.00%
0.047568	-50	293	40.47%
0.047568	-51	27	3.73%
0.047568	-52	29	4.01%
0.047568	-53	125	17.27%
0.047568	-54	250	34.53%
0.051874	-50	280	38.67%
0.051874	-51	30	4.14%
0.051874	-52	26	3.59%
0.051874	-53	23	3.18%
0.051874	-54	362	50.00%
0.051874	-55	3	0.41%



5.3.5.3 Representación de los PDF

Mediante la librería *pqlxPNG* se representa gráficamente los PDF generados para un determinado periodo de tiempo. Como se puede

ver en la Figura 5.9, cada bin frecuencial tiene diferentes valores de poder (eje de las coordenadas), los cuales son además codificados con una escala de colores (lado derecho de la imagen) a fin de indicar la probabilidad de ocurrencia, siendo los colores más cálidos los más recurrentes.

De esta manera, se muestra verdaderamente cuanto varía el ruido sísmico para un periodo de tiempo, ya que todas las posibilidades son mostradas.

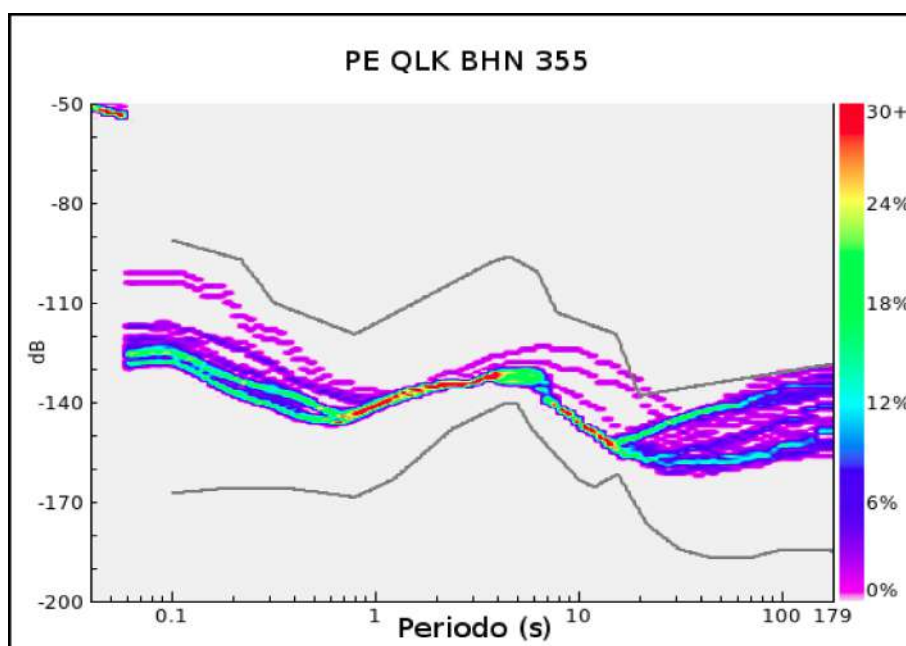


Figura 5.9: Función probabilidad de la densidad, para la estación Quilca (QLK) correspondiente al día 21/12/2015.

5.4 Interpretación de los Niveles de Ruido Sísmico

En el CAPÍTULO VI se presentan los resultados obtenidos para cada una de las estaciones sísmicas que integran la REDSSAT a cargo del IGP, aplicando el procedimiento descrito anteriormente. Adicionalmente, para cada estación sísmica se necesita tener en cuenta sus características geológicas (fuente: Carta Geológica Nacional-INGEMMET), geográficas, climatológicas (fuente: base de datos del Senamhi) y demográficas (fuente: censo poblacional INEI-2015).

En conjunto, la información descrita en el párrafo anterior, junto con los criterios detallados en las secciones 4.3 (Modelo Global de Ruido Sísmico) y 4.4 (Características y Fuentes de Ruido Sísmico), son utilizados para realizar la

evaluación y caracterización de los niveles de ruido sísmicos para los diferentes periodos temporales elegidos para cada componente de cada estación sísmica de la REDSSAT-IGP.

CAPÍTULO VI RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

6.1 Generalidades

La metodología descrita en el CAPÍTULO V ha sido aplicada a las estaciones que integran la REDSSAT-IGP con el objetivo de realizar la evaluación de los niveles de ruido sísmico a fin de determinar si cada una de ellas se encuentra dentro de los umbrales de ruido máximos permitidos.

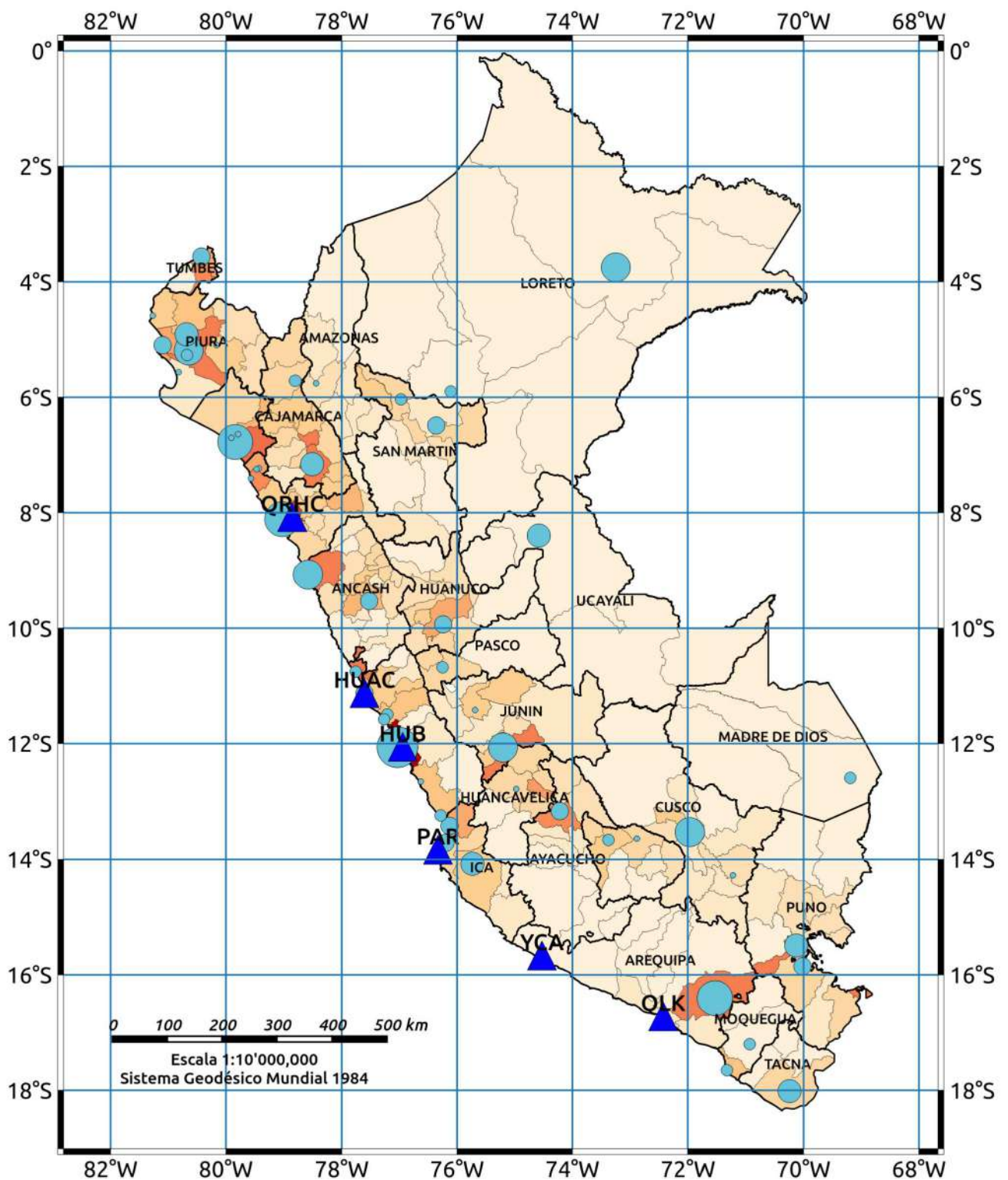
Para este análisis, las 22 estaciones de la REDSSAT han sido divididas en tres grupos según su ubicación, con respecto a la Cordillera de los Andes.

6.2 Estaciones Sísmicas de Ante-arco

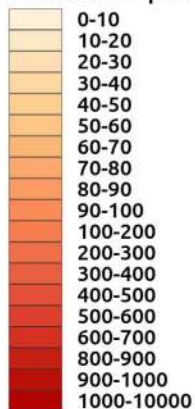
Bajo esta clasificación se encuentran las estaciones sísmicas más cercanas a la línea de costa del Océano Pacífico. En la Tabla 6.1 se presenta sus coordenadas geográficas, elevaciones y distancias con respecto a la línea de costa. El mapa de la Figura 6.1 muestra la distribución espacial de estas estaciones, junto con las ciudades más pobladas del país y el índice de densidad poblacional por provincias.

Tabla 6.1: Estaciones de Ante-arco

NOMBRE	COD	LAT (°)	LON (°)	ELEV (msnm)	DIST COSTA(km)
Quilca	QLK	-16.71	-72.42	87	0.7
Huacho	HUAC	-11.12	-77.60	35	1
Yauca	YCA	-15.66	-74.52	62	5
Paracas	PAR	-13.83	-76.33	207	3
Mayorazgo	HUB	-12.05	-76.99	281	15
Quirihuac	QRHC	-8.07	-78.85	242	22



Personas por km²



▲ Estación Sísmica

Ciudades mas pobladas

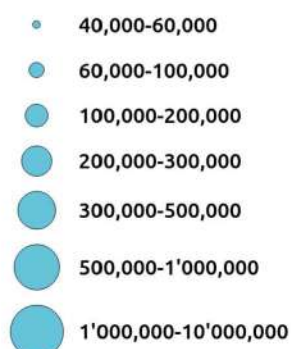


Figura 6.1: Distribución Espacial de Estaciones Sísmicas de Ante-arco de la REDSSAT.

6.2.1 Estación Quilca (QLK)

La estación sísmica Quilca se encuentra ubicada en la zona costera del departamento de Arequipa, exactamente en el distrito de Quilca perteneciente a la provincia de Camaná. Se ubica en las coordenadas geográficas: 16.71°S, 72.42°O y a una altitud de 87 m.s.n.m.; además, esta a aproximadamente 600 metros de la línea de costa.

Demográficamente, el distrito de Quilca tiene una población reducida (661 habitantes), además, la carretera costanera pasa a ~100 metros de la estación. La ciudad populosa más cercana, Camaná (aprox.50,000 habitantes), y ella se encuentra a 32 km al ONO de la estación.

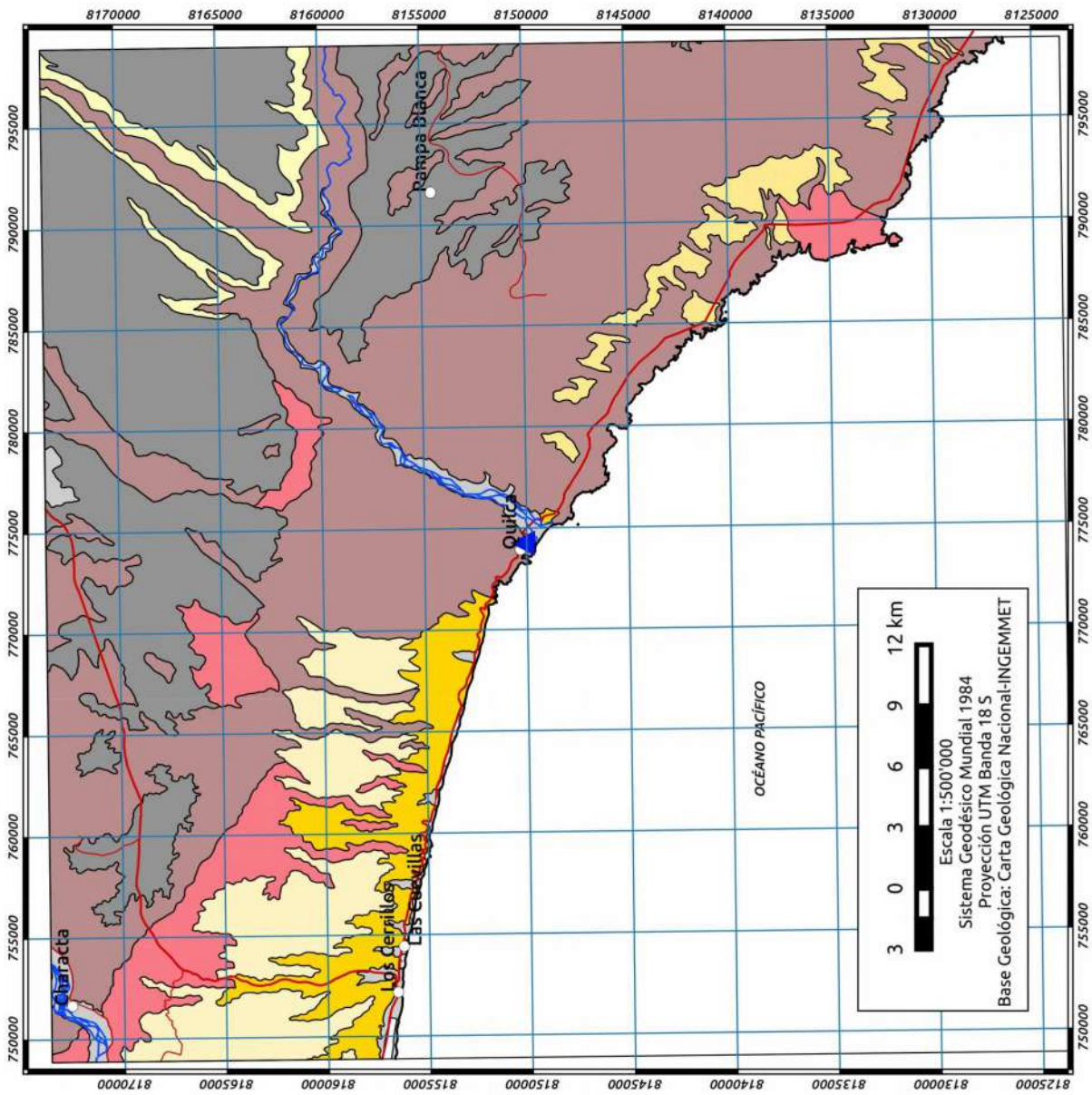
6.2.1.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.2 presenta la geología local entorno a la estación Quilca. Esta se encuentra instalada sobre rocas metamórficas correspondientes al Complejo Basal de la Costa. Exactamente, se trata de un gneis, el cual corresponde al tiempo geológico Precámbrico-Paleozoico inferior (García, 1968). Estas rocas son por consiguiente muy antiguas y están altamente metamorfoseadas.

6.2.1.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo Desértico-Arido-Subtropical, lo que implica precipitaciones poco frecuentes, una temperatura semi-cálida y un grado alto de humedad por su cercanía al litoral.

La temperatura media anual fluctúa entre 18 y 19°C. El cielo presenta frecuentemente nubosidad y escasa o nula precipitación. En invierno amanece nublado o cubierto y hacia el medio día las nubes tiende a disiparse. Las lluvias son raras a lo largo del año. En contraste, cuando el fenómeno del niño se presenta da origen a lluvias de intensidad moderada.



ERA	SISTEMA	SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos Marinos Deposito Aluvial Depósito Aluvial Pleist.	Batolito Atico-Camandá
		Pleist.	Formación Millo	
	Neogeno	Mioceno	Formación Moquegua Formación Pisco Formación Camandá	
Paleoz.		Ordovicio	Complejo Basal de la Costa	
		Paleoproterozoico		

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica QLK
- Pueblos
- Drenaje
- Línea de costa
- Río Principal
- Vías
- Carretera Principal
- Carretera Secundaria

Figura 6.2: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica QLK

6.2.1.3 Variación diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Quilca se tomaron los registros de 5 días de semana (10-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 02:00-08:00, 08:00-14:00, 14:00-20:00, 20:00-02:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.3, 6.4 y 6.5 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

Primero, para periodos cortos (<2 segundos), la variación del ruido sísmico es mínima en las componentes horizontales y para la componente vertical, el cambio es un poco más notorio, pero de la misma manera, mínimo. Debido a la escasa población que presenta el distrito de Quilca, no se registra ruido cultural.

En el dominio de periodos largos (>20 s), se esperaría una variación en las componentes horizontales debido probablemente a los cambios diurnos de presión y temperatura (Sorrells, 1971). Sin embargo, roca sólida sobre la cual esta instalada la estación reduce enormemente estos efectos.

Para la banda de los microsismos, se ve que los niveles de ruido en las tres componentes muestran valores de 10 dB por encima del límite mínimo en el periodo de 5 s. Adicionalmente, las características frecuenciales del ruido presente en las tres componentes es similar debido a la transferencia omni-direccional de este tipo de ruido.

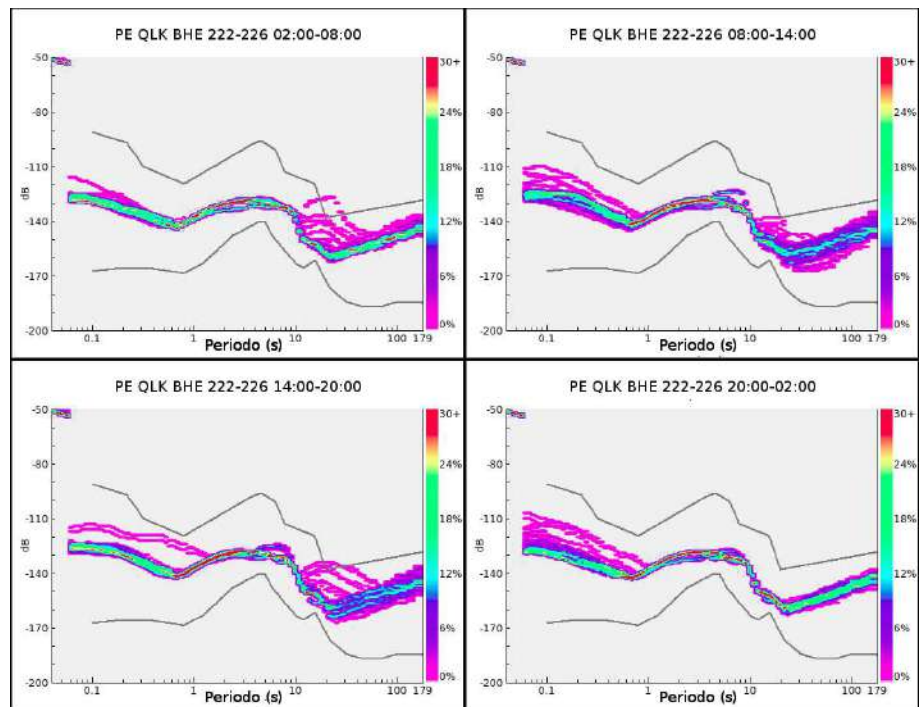


Figura 6.3: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación QLK.

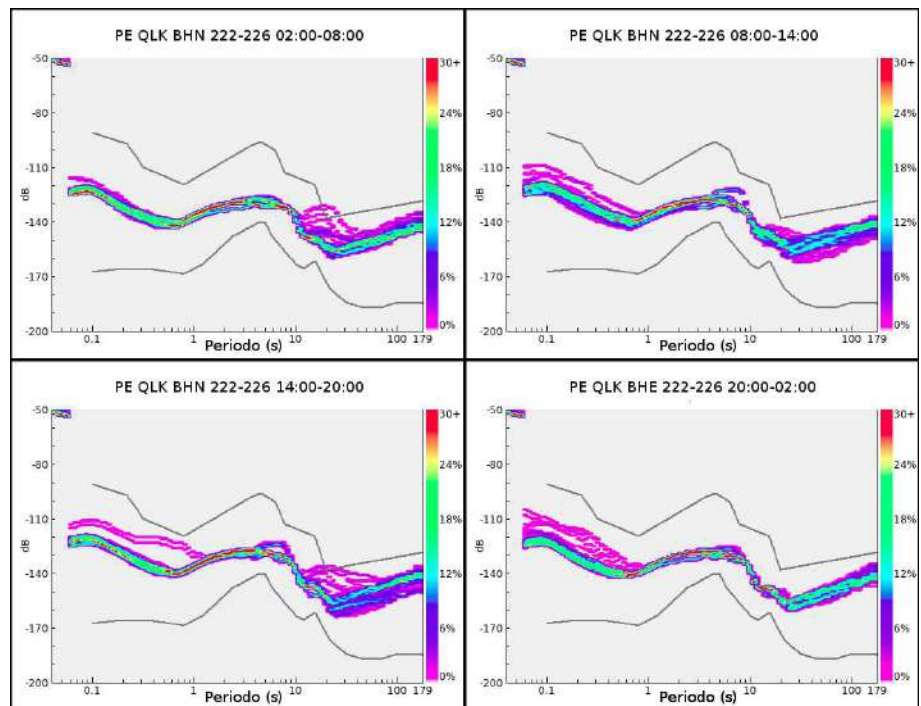


Figura 6.4: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación QLK.

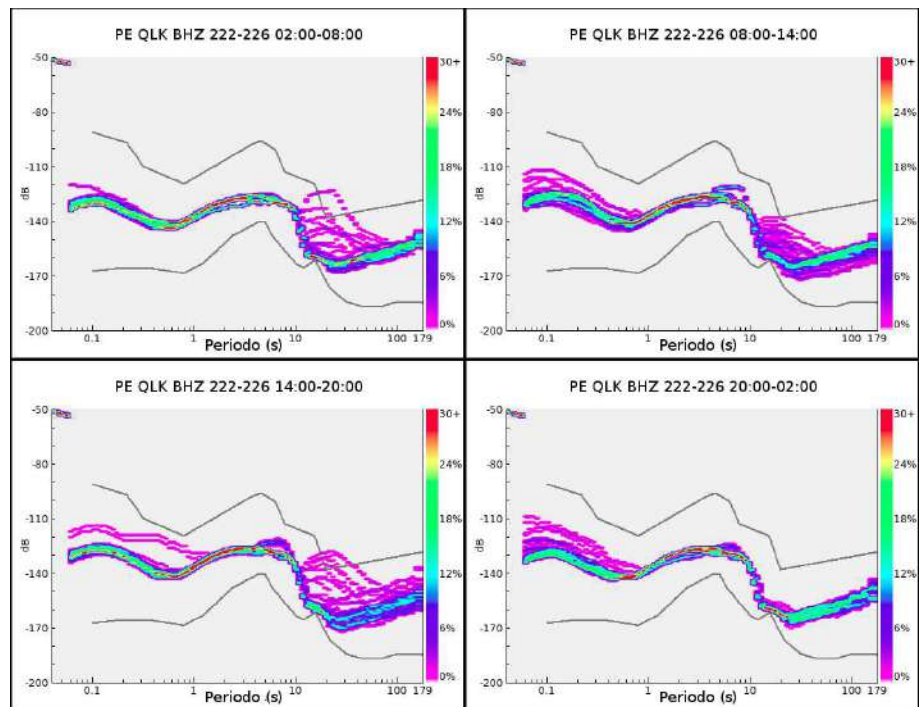


Figura 6.5: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación QLK.

6.2.1.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.6. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve como el ruido sísmico en la banda de periodos superiores a 20 segundos, presenta niveles similares tanto en el verano como en el invierno. Sin embargo, la variabilidad en verano es más notoria. Esto se debe probablemente a que la variación térmica en un día de verano es mucho mayor que en el invierno en la zona costera. Adicionalmente, se puede observar como el ruido en la componente BHZ es claramente inferior al observado en las

componentes horizontales.

Para periodo cortos, no se diferencia cambio alguno entre el verano y el invierno.

Para la banda de microsismos oceánicos secundarios, hay un claro cambio en el pico dominante, siendo para el verano 5 s, el cual cambia drásticamente hacia 10 s para el invierno. Este cambio se da en todas las componentes. Por otro lado, la banda de microsismos oceánicos primarios solo es notoria durante el invierno.

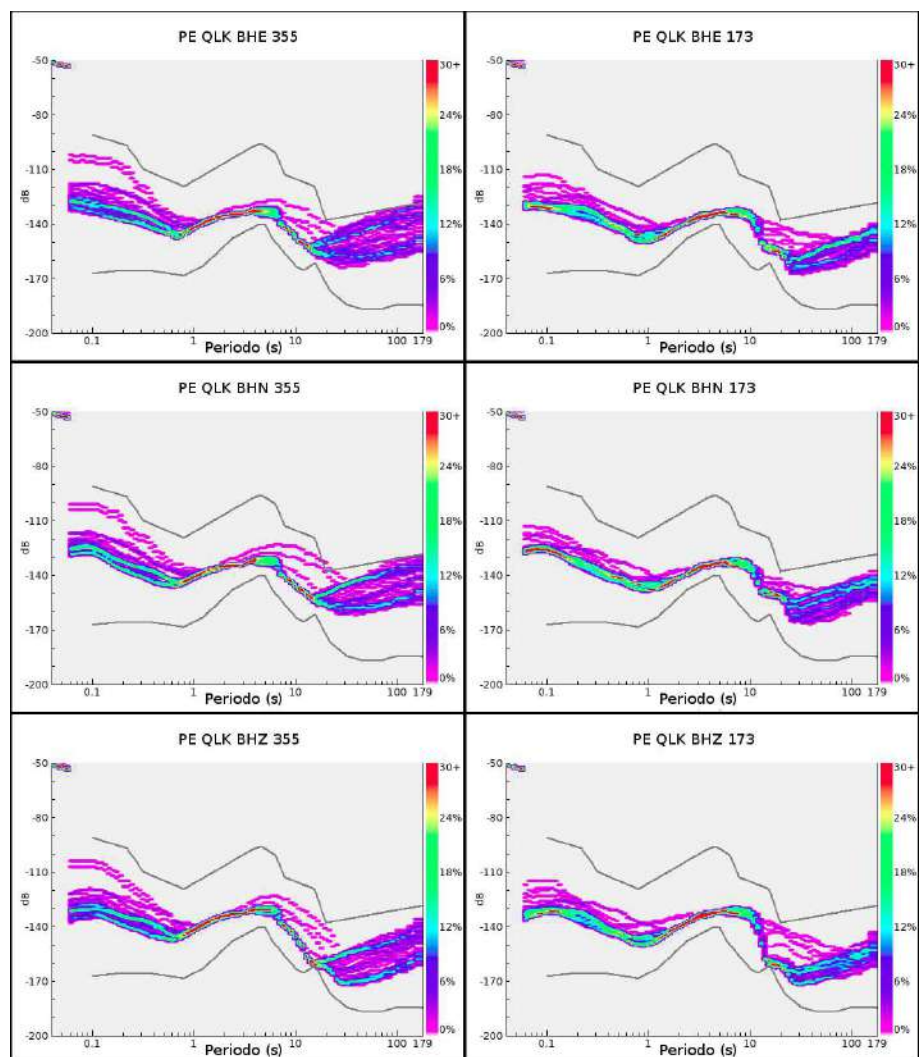


Figura 6.6: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación QLK. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre). A la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.2.2 Estación Huacho (HUAC)

La estación sísmica Huacho, esta ubicada en el distrito del mismo nombre, provincia de Huaura, departamento de Lima. Esta localizada en las coordenadas geográficas: 11.12°S, 77.60°O y a una altitud de 35 m.s.n.m.; además, esta separada de la línea de la costa por 1 km.

Demográficamente, la provincia de Huaura, tiene una densidad poblacional de 44.5 *habitantes/km²*. La estación se encuentra en el extremo sur de la ciudad de Huacho, la cual tiene una población de 153,728 *habitantes*.

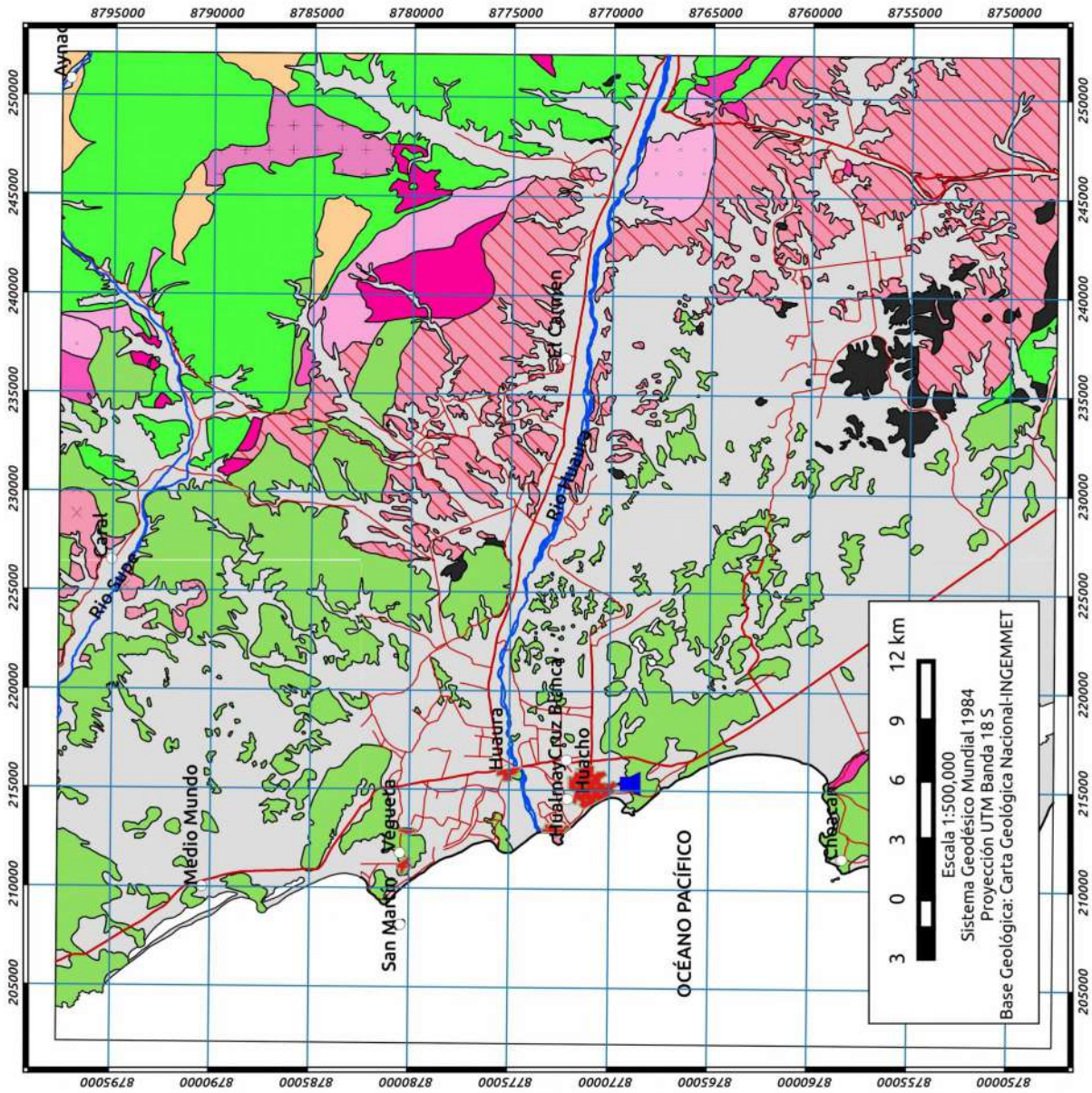
6.2.2.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.7 presenta la geología local alrededor de la estación Huacho. Se encuentra instalada sobre depósitos Cuaternarios de tipo Aluvial de poco espesor, ubicados en el borde sur de la cuenca (Cobbing, 1973). A su vez, sobreyacen sobre las rocas de la Formación Casma, la cual es una serie de volcánicos con sedimentarios intercalados, se le estima una potencia de ~2,000 m. Estos últimos son datados al Cretáceo Inferior.

6.2.2.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima semicálido, desértico, con precipitaciones escasas o nulas en todas las estaciones, y con humedad relativa calificada como húmedo.

La estación meteorológica de la Universidad de Huacho, la cual se encuentra 40 m de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van desde los 30 hasta los 17°C para el verano, y de 20 hasta 14°C para el invierno. Los vientos presentan velocidades de 6 hasta 11 *m/s*, con una dirección preferencial hacia el suroeste.



ERA	SISTEMA	SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiv
Cenozoico	Cuaternario		Depósitos Cuaternarios	Complejo Adamelico de Rio Supe
		Terciario		Complejo de Santa Rosa
Mesozoico	Cretaceo			Complejo de Paccho
		Inf.		Complejo Purmacana
	Superior		Volcánico Calipuy	Complejo La Mina
				Metadiorita
			Diorita	
				Diorita Básica
				Diorita Biotítica
				Gabro
				Formación Casma

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica HUAC
- Estación Meteorológica
- Ciudad
- Pueblo
- Drenaje
- Río principal
- Vías
- Via Principal
- Via Secundaria

Figura 6.7: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica HUAC.

6.2.2.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Huacho se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, el ruido sísmico está dentro de los niveles aceptables, pero muy cercano al límite máximo, llegando incluso a igualarlo en ciertas horas del día. Los altos niveles podrían deberse a que la estación esta ubicada sobre depósitos cuaternarios los cuales amplifican el ruido de fondo.

Para la banda de periodos cortos (<2 s), el ruido aumenta hasta en 10 dB en todas las componentes para las horas del día, asociado probablemente al ruido antrópico generado por la población en la ciudad de Huacho y el terreno no óptimo sobre el cual la estación esta instalada. Adicionalmente, el cambio es igual tanto para BHE como para BHN, por lo que no se observa alguna posible direccionalidad de la fuente del ruido.

Para la banda de periodos largos (>20 s), en la componente BHE se ve como los niveles de ruido aumentan para horas diurnas y disminuyen para horas nocturnas. Este efecto no es notorio en la componente BHN, ya que presenta niveles relativamente estables a lo largo del día. Esto podría ser explicado por la orientación del sistema de briza marina y vientos continentales (Murphy y Savino, 1975), los mismos que durante el día actúan en dirección de Océano hacia Continente e inversa (O-E y E-O). Por otro lado, en la componente BHZ los niveles no muestra variación diurna.

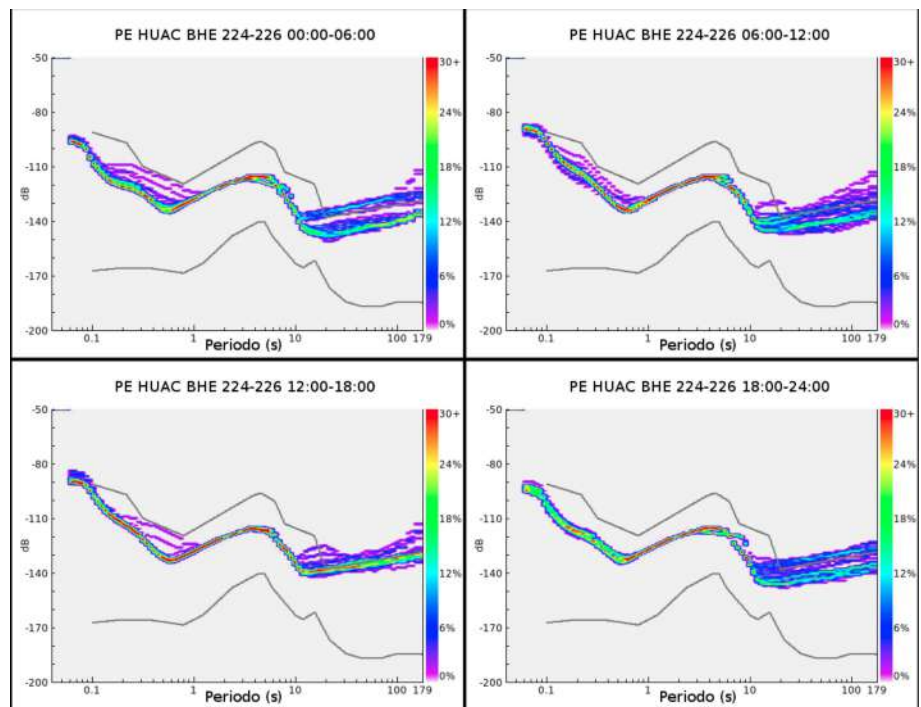


Figura 6.8: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación HUAC.

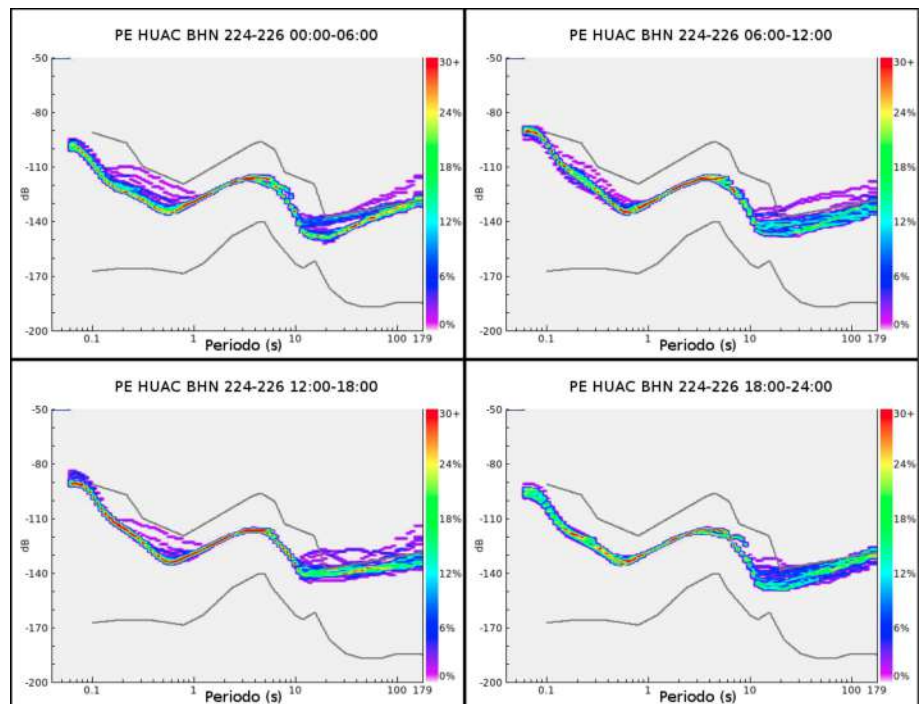


Figura 6.9: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación HUAC.

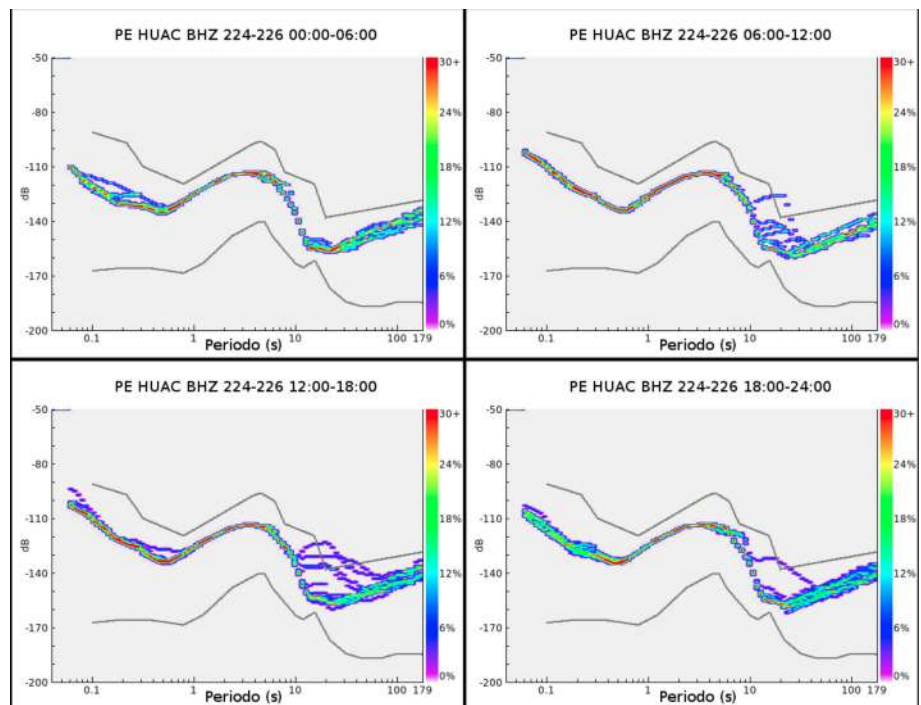


Figura 6.10: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación HUAC.

6.2.2.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.11. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los del invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve como el ruido sísmico en la banda de periodos superiores a 20 segundos, es tan solo un poco más alto en el verano que en el invierno, debido probablemente a que la variación térmica es más amplia en el verano (variando hasta 13° ; mientras que, en el invierno solo es de 4°) (Gebauer et al., 2010).

Los microsismos oceánicos tienen su pico dominante entre los periodos 2-3 s en el verano. En el invierno, se incrementa, y el

periodo dominante se desplaza hacia periodos más largos. Este cambio estaría relacionado con el aumento de la intensidad de las tormentas durante el invierno del hemisferio sur.

Para periodo cortos, no se diferencia una variabilidad debido al cambio de estaciones. Adicionalmente, los niveles de ruido de la componente BHZ son inferiores a aquellos de BHE y BHN en la banda de periodo corto y, sobre todo, en la banda de periodos mayores a 20 s.

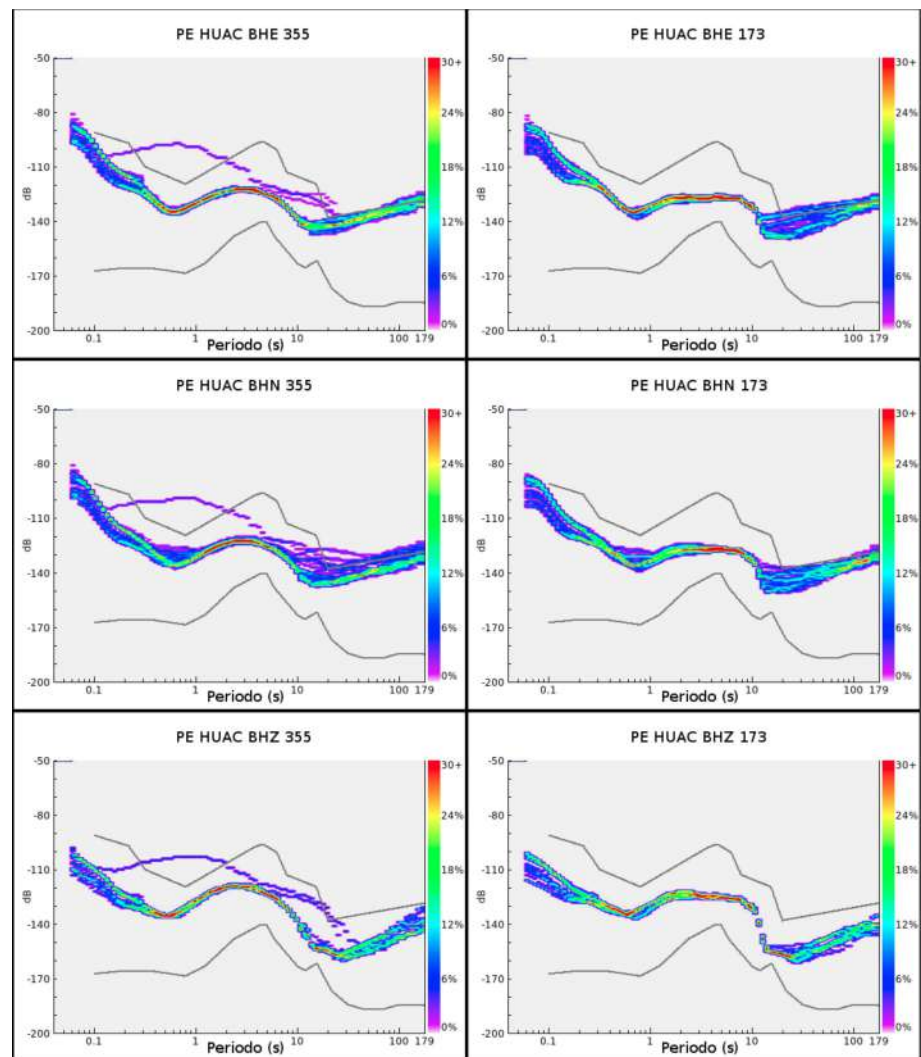


Figura 6.11: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación HUAC. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.2.3 Estación Yauca (YCA)

La estación sísmica Yauca se encuentra en el distrito del mismo nombre, provincia de Caraveli, departamento de Arequipa. Se ubica en las coordenadas geográficas: 15.66°S, 74.52°O, a una elevación de 62 m.s.n.m. y a tan solo 5 km del litoral.

La provincia de Caraveli no es muy populosa, ella presenta una densidad poblacional de 3.1 *habitantes/km²*. El pueblo de Yauca (~1,500 *habitantes*) se encuentra menos de 200 m de la estación, y la carretera Panamericana a menos de 1 km.

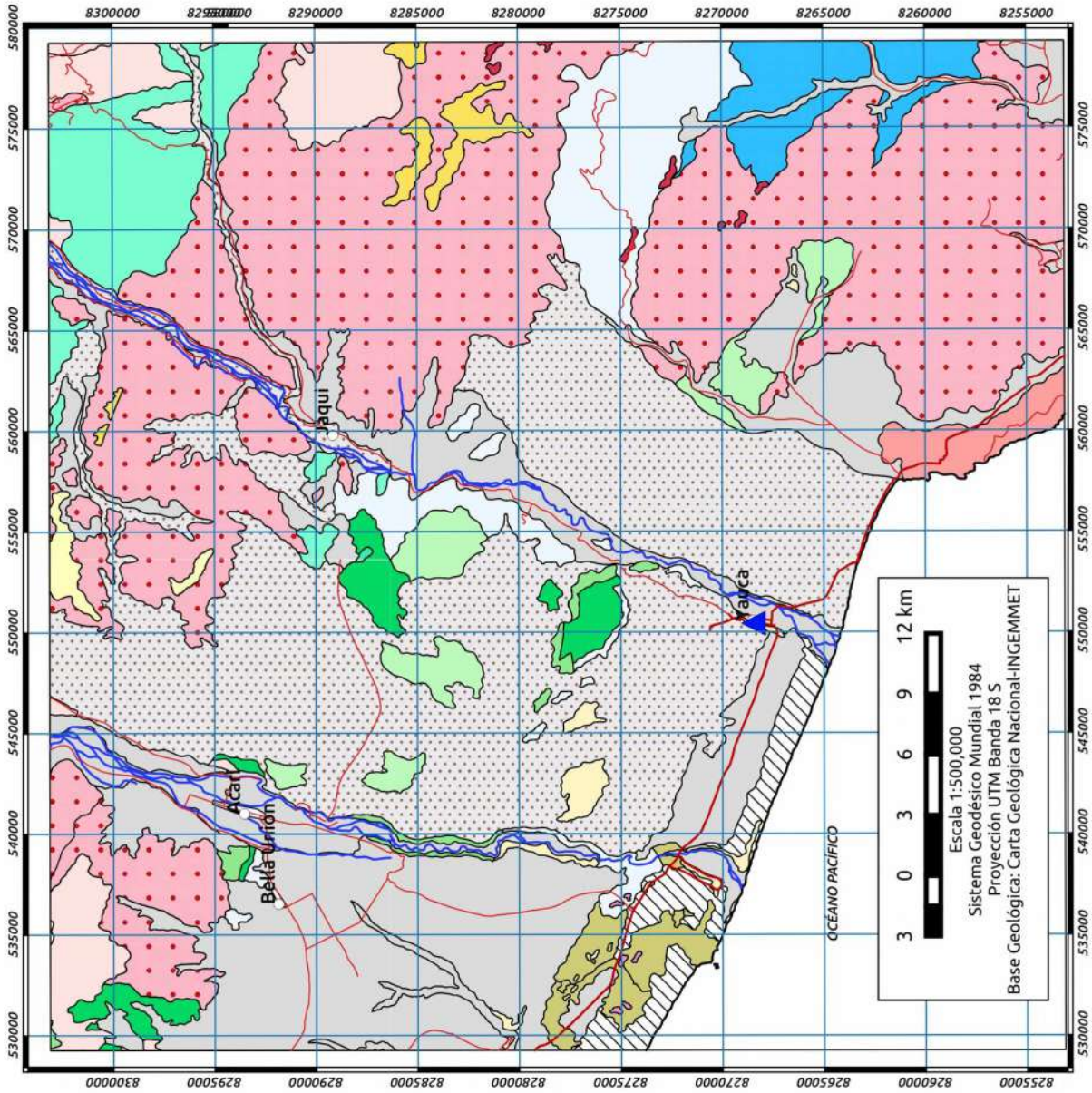
6.2.3.1 Geología

En el Mapa de la Figura 6.12 se presenta la geología local de los alrededores de la estación Yauca. La estación ha sido instalada sobre Depósitos Aluviales holocénicos de composición conglomerádica. Estos depósitos a su vez representan una cobertura de poco espesor que cubre los estratos de la Formación Pisco compuesta principalmente por areniscas (Caldas, 1978).

6.2.3.2 Clima

Según la clasificación Thornthwaite, la zona presenta un clima Semi-Cálido (Desértico-Arido-Subtropical), En general, las precipitaciones son escasas, la temperatura semi-cálida y el clima es húmedo.

Las temperaturas máxima y mínima varían de 24°C a 18°C para la temporada de verano y de 18°C a 12°C para el invierno. La velocidad del viento promedia los 4 *m/s* con dirección SE.



ERA	SISTEMA	SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiv	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósito Aluvial		
			Depósito Eólico		
Mesozoico	Neogeno	Pleist.	Terraza Marina		
			Formación Pisco		
			Grupo Nazca		
	Cretáceo		Formación Moquegua	Batolito Triabaya	
			Complejo Santa Rita	Superunidad Linga	
			Grupo Casma		
	Jurásico	Sup.	Formación Hualhuani		
		Inf.	Formación Guaneros	Diorita	
	Paleoz.	Devonico Silurico		Formación Chocalte	
				Complejo Basal de la Costa	Batolito San Nicolas
		Precambriico			

Legenda

- ▲ Estación Sísmica YCA
- Pueblos
- Drenaje
- Río Principal
- Vías
- Vía Principal
- Vía Secundaria

Figura 6.12: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica YCA.

6.2.3.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico de estación Yauca se tomaron los registros de 5 días de semana (10-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.13, 6.14 y 6.15 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico son muy altos, sobrepasando los límites máximos en el dominio de periodos largos y cortos, sobre todo en las componentes horizontales. Estos niveles desfavorables se deberían a que la estación esta instalada sobre una cobertura aluvial, que sobreyace las rocas sedimentarias de edad miocénica de la Formación Pisco.

Para la banda de periodos cortos (<2 s), el ruido es muy parecido en las 3 componentes, mostrando un ligero aumento (~ 5 dB) para las horas diurnas. Este aumento se podría atribuir al tránsito de vehículos por la carretera panamericana (Meredith, 1975).

Para la banda de periodos largos (>20 s), en las componentes horizontales se ve como los niveles de ruido aumentan para horas diurnas y disminuyen para horas nocturnas. Este cambio sería producto de los cambios de los factores atmosféricos durante el día, los que junto al inadecuado terreno, hacen que la deformación del suelo sea mayor (Murphy y Savino, 1975), hasta el punto de llegar a superar el límite máximo hasta por 20 dB durante el periodo 12:00-18:00. Por otro lado, para la componente vertical, el ruido es estable a lo largo del día.

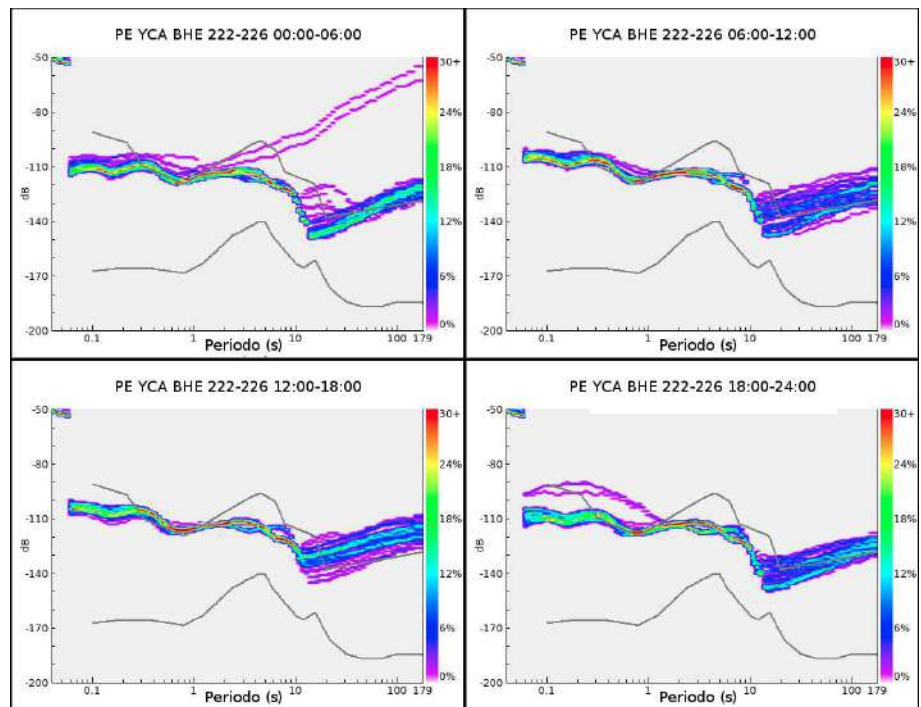


Figura 6.13: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación YCA.

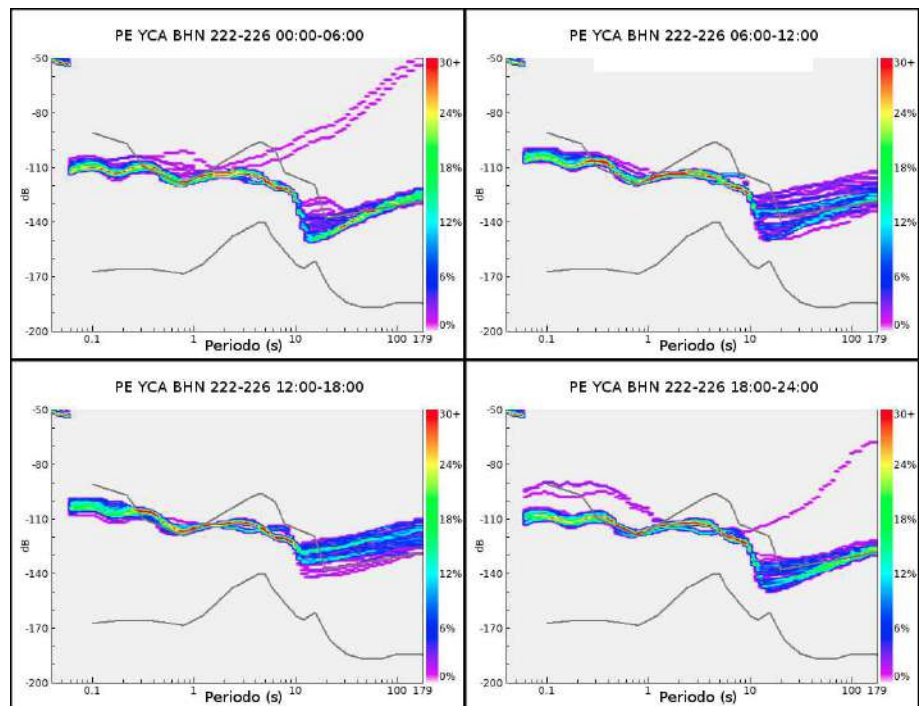


Figura 6.14: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación YCA.

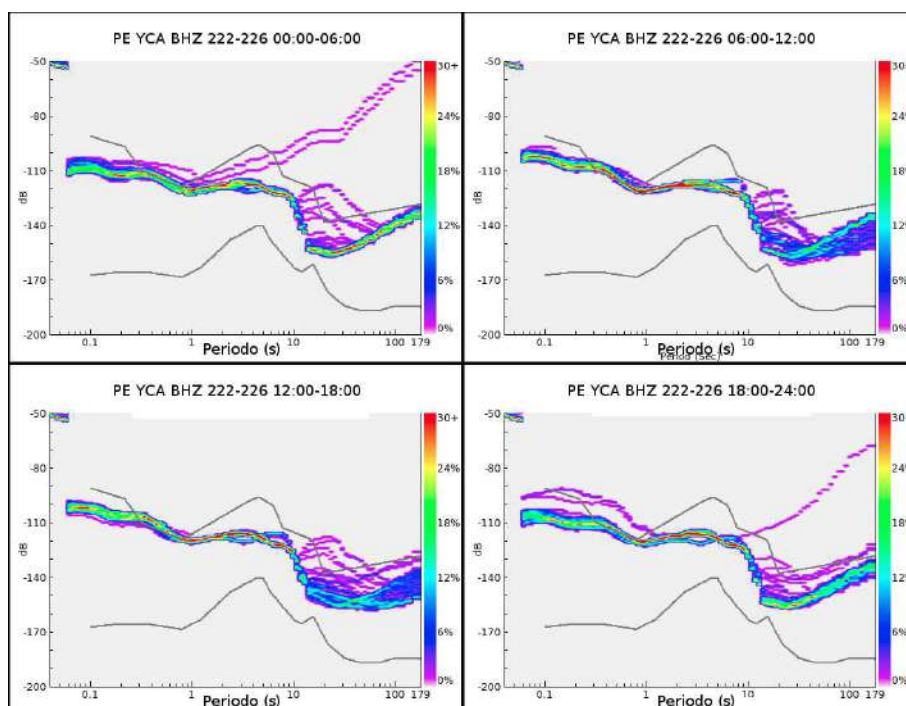


Figura 6.15: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación YCA.

6.2.3.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio y al fin del verano. Para esto, se procesan los respectivos PDFs correspondientes a 24 horas en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.16. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha al fin del verano (5 de marzo). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve que para la banda de periodos largos el ruido sísmico no muestra ningún cambio significativo entre el inicio y el fin del verano. Sin embargo, la variabilidad para el primer caso es mucho mayor.

Los microsismos oceánicos tienen su pico dominante no tan agudo durante el verano a 1-2 s. Por otro lado, para el 5 de marzo se ve como los niveles de ruido causados por los

microsismos aumentan significativamente. Este aumento se hace mayor a medida que se acerca el invierno, y se relaciona con el aumento del número de tormentas durante el invierno en el Pacífico (Stutzmann et al, 2000).

Para periodo cortos, no se llega a diferenciar una variación estacional. Adicionalmente, los niveles de ruido de la componente BHZ son inferiores al de las componente horizontales a lo largo de la banda de periodo largo.

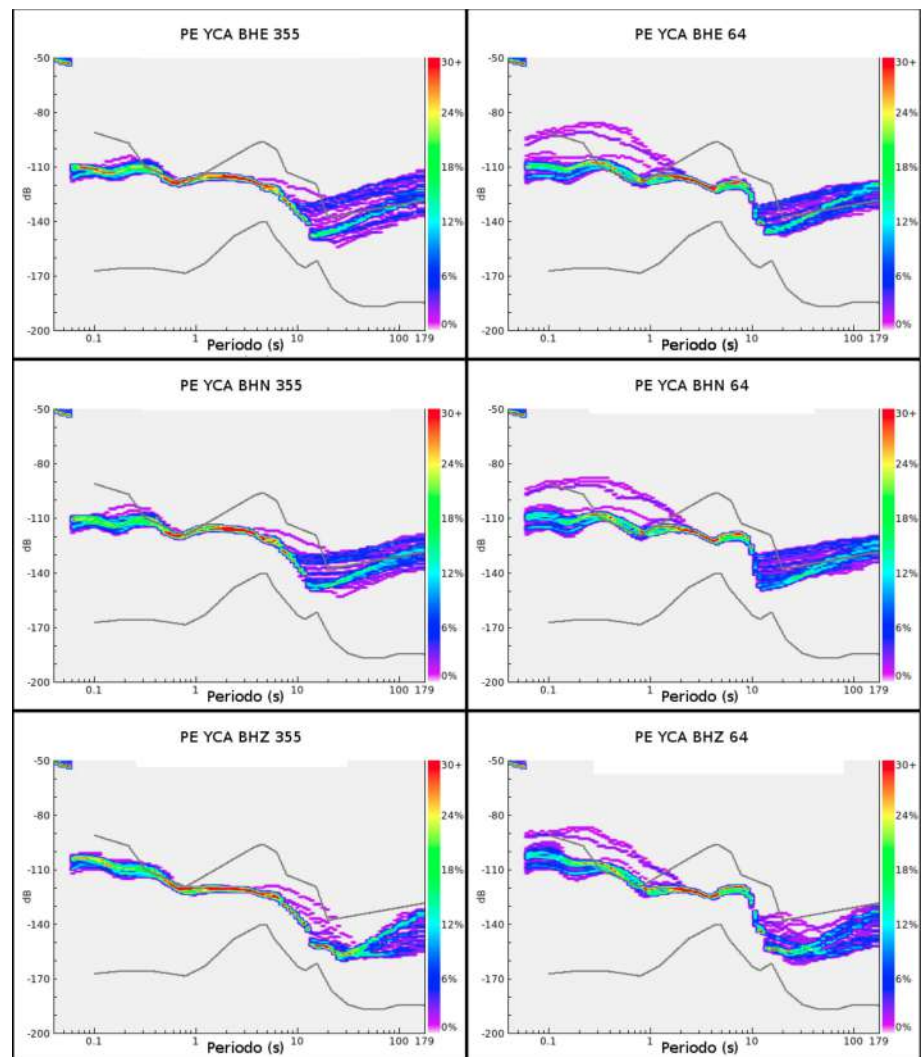


Figura 6.16: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación YCA. A la izquierda los PDF's correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al final del verano (5 de marzo). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.2.4 Estación Paracas (PAR)

La estación sísmica Paracas, esta ubicada en el distrito del mismo nombre, provincia de Pisco, departamento de Ica. Se localiza en las coordenadas geográficas: 13.82°S, 76.33°O, a una altitud de 207 m.s.n.m.; además, se encuentra a tan solo 3 km del Océano Pacífico.

Demográficamente, la provincia de Pisco presenta una densidad poblacional 34.4 *habitantes/km²* . Pisco, es la ciudad más cercana, ubicada a 19 km al noreste, con una población de 104,656 *habitantes* .

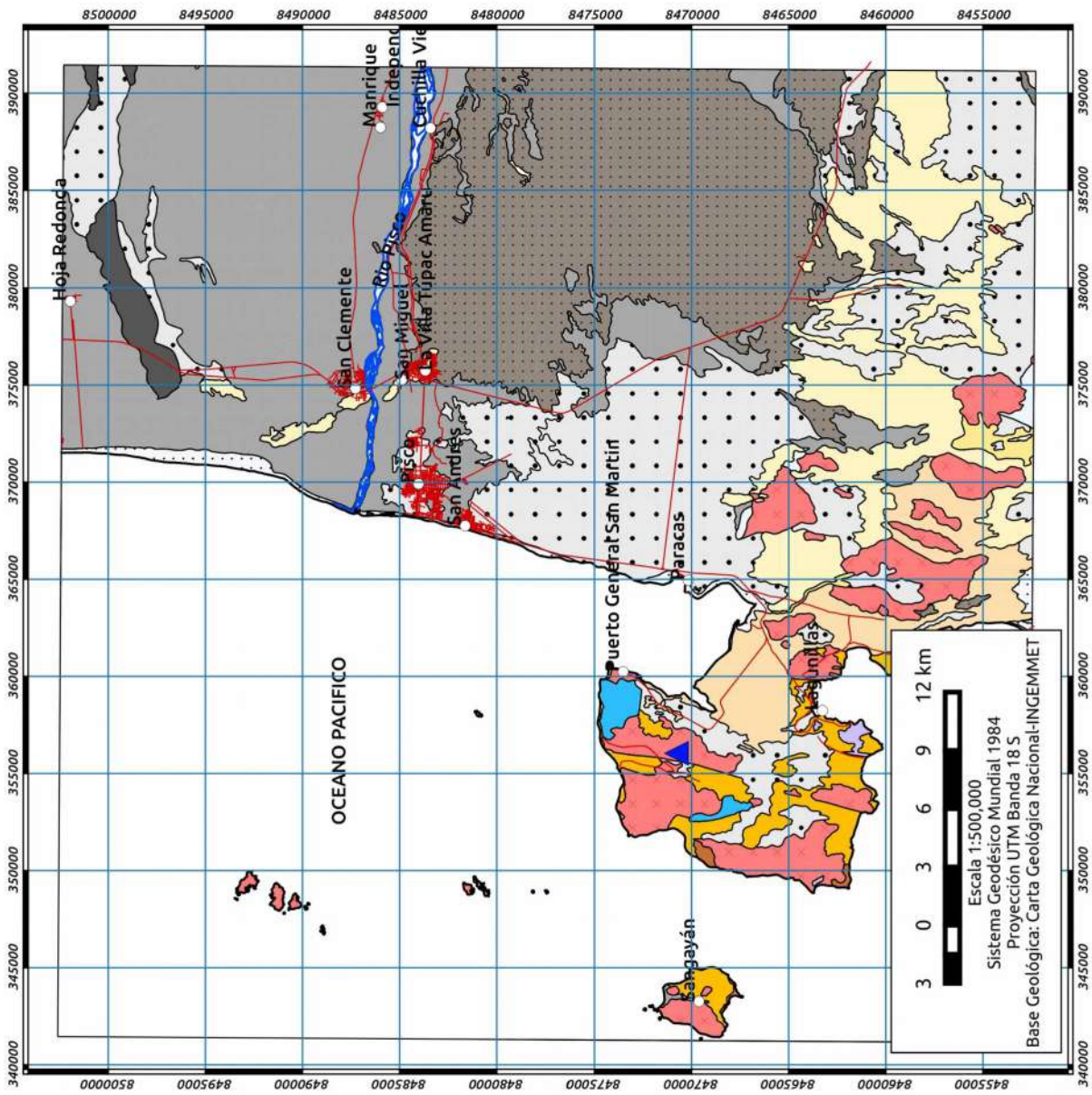
6.2.4.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.17 presenta la geología local del área de la estación Paracas, la misma que se encuentra instalada sobre rocas intrusivas que forman parte del Batolito de San Nicolás. La litología corresponde a granitos porfiríticos. Este batolito es datado al Devónico-Silurico (Fernández D., 1993).

6.2.4.2 Clima

Según la clasificación Thornthwaite, la zona presenta un clima semi-cálido, desértico, con deficiencia de lluvias en todas las estaciones. Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 18 y 19°C, decreciendo a medida que la altitud aumenta.

El cielo es por lo general nuboso en las mañanas, y se va despejando a medida que avanza el día. A pesar de la nubosidad, las precipitaciones son casi nulas, lo que la tipifica como una zona árida. La altitud relativamente alta con respecto a su cercanía al mar, indicaría la presencia de vientos con velocidades elevadas.



ERA	SISTEMA	SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósito Marino	Batalito San Nicolás
			Depósito Eólico	
			Depósito Eluvial	
	Pleist.	Depósito Aluvial	Formación Cañete	
			Formación Pisco	
	Neog.	Mioc.	Formación Chicaltay	
			Formación Yumaque	
	Paleog.	Oligoc.	Formación Choros	
			Formación Guaneros	
			Formación Chocolate	
Mesozoi.	Jurásico	Sup.	Grupo Ambo	
		Inf.	Complejo Basal de la Costa	
Paleoz.	Carbonífero	Devonico Silúrico		
			Mesoproterozoico	

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica PAR
- Localidad
- Vías
- Drenaje
- Río principal

Figura 6.17: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica PAR.

6.2.4.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Paracas se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En la Figura 6.18 se muestra las representaciones del ruido sísmico para la componente BHZ. En general, presenta buenos niveles de ruido sísmico, excepto en la banda de periodo largo, donde muestra niveles similares al límite máximo. Su instalación sobre una roca intrusiva debería ser sinónimo de bajos niveles de ruido; sin embargo este no es el caso.

Para la banda de periodos cortos (<2 s), el ruido muestra un ligero aumento (10 dB) durante los intervalos diurnos, producto de la actividad vehicular y humana en la carretera y en la ciudad de Paracas. No obstante, los niveles máximos no son superados en ninguna instancia.

Para la banda de periodos largos (>20 s), no se nota alguna variación considerable en BHZ. Sin embargo, los niveles son muy altos, encontrándose al límite o superando los niveles observados durante todo el día.

La banda de microsismos oceánicos no muestra variación diurna, pero si valores altos debido a su cercanía al Océano Pacífico.

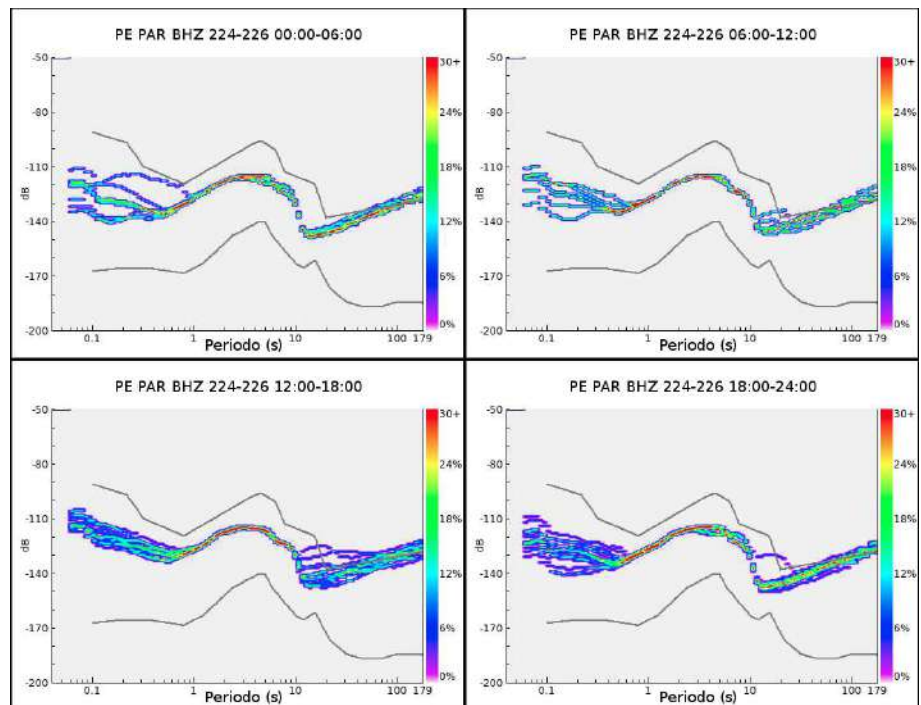


Figura 6.18: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación PAR.

6.2.4.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.19. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio) de la componente BHZ.

En general, tanto los niveles de ruido sísmico de periodo corto como largo en la componente BHZ, son ligeramente inferiores durante el invierno con respecto al verano.

Los microsismos oceánicos secundarios muestran en el verano un pico dominante al rededor del periodo 2.5 s, y otro menor en el periodo 6 s. Para el invierno, ambos pico se aplanan y la frecuencia dominante cambia hacia periodos más largos (8-9 s).

Además, a pesar de la cercanía al océano, el pico de los microsismos primarios no se distingue en ninguna de las épocas ya que es opacado por el ruido de periodo largo.

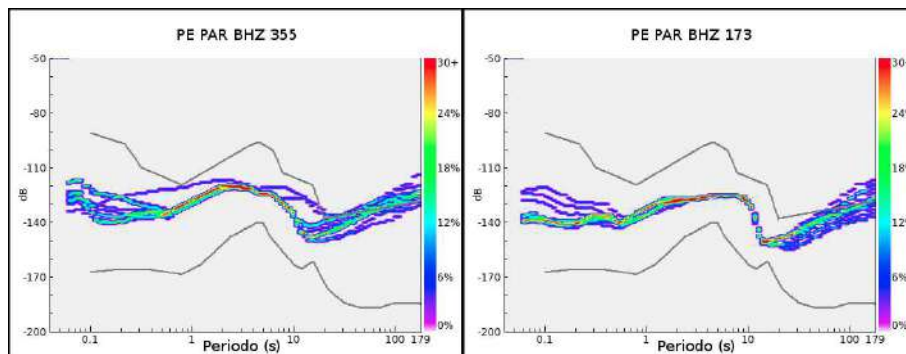


Figura 6.19: Variación Estacional del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación PAR. A la izquierda los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al final del verano (22 de junio).

6.2.5 Estación Mayorazgo (HUB)

La estación sísmica Mayorazgo se encuentra instalada en el distrito de Ate, provincia de Lima. Se ubica en las coordenadas geográficas: 12.05°S, 76.94°O, a una altitud de 281 m.s.n.m. y ubicada a 15 km de la línea de costa.

Demográficamente, la provincia de Lima es la que presenta mayor densidad poblacional en todo el Perú, con 3296.7 habitantes/km² y una población total de 9'866,647 habitantes .

6.2.5.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.20 presenta la geología local entorno a la estación Mayorazgo. La estación sísmica ha sido instalada sobre Depósitos Aluviales Recientes. Estos depósitos están compuesto por materiales gruesos de cantos y gravas sub-redondeadas en matriz arenosa, con materiales finos en los niveles más profundos (Palacios et al., 1992). Estos depósitos tienen espesores menores a 30 m, y se encuentran sobreyaciendo la superficie de las Súper Unidades Patap y Santa Rosa.

6.2.5.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima Semi-Cálido. Este clima, en general, es húmedo y semi-cálido, además es árido debido a las escasas precipitaciones.

Según los datos de la estación meteorológica Von Humboldt, ubicada a 3 km al sur de la estación, la temperatura máxima y mínima varía de 29°C a 20°C para el verano y de 23°C a 17°C en el invierno. Los vientos se mueven con dirección preferencial al suroeste con velocidades que no suelen sobrepasar los 2m/s .

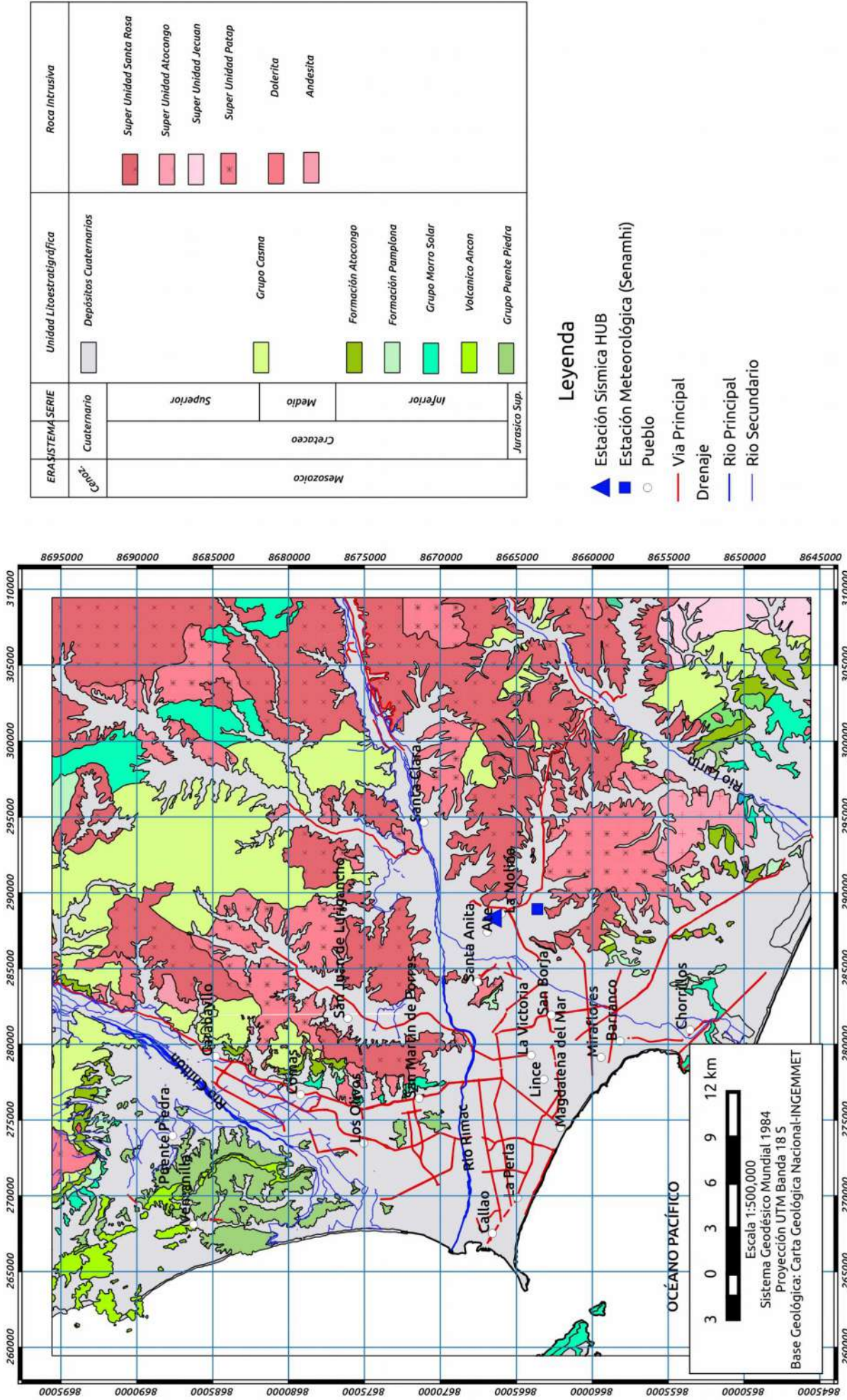


Figura 6.20: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica HUB.

6.2.5.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Mayorazgo se tomó el registro de los días 11 y 12 de agosto. Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.21, 6.22 y 6.23 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico se encuentran por debajo de los límites superiores. Siendo la banda de periodos cortos la que presenta los niveles más altos, debido probablemente al ruido de origen antrópico proveniente de la actividad humana, junto con el tipo de suelo sobre el cual la estación ha sido instalada.

Para la banda de periodos cortos (<2 s), el ruido sísmico presenta niveles muy elevados; además, hay un ligero incremento (<5 dB) en las hora diurnas. Sería de esperarse una variación diurna mucho mayor, dada la cantidad de actividad humana en las cercanías, sin embargo, este no es el caso.

Para la banda de periodos largos (>20 s), en ninguna de las componentes se percibe un cambio significativo de los niveles del ruido. Esto se debe a que el sensor esta instalado a una profundidad de 4 metros y por lo tanto aislado de los factores ambientales (presión atmosférica, temperatura, etc)(Sorrels et al., 1971).

La banda de microsismos oceánicos no presenta variación diaria y los niveles de ruido sísmico son similares en las tres componentes a lo largo de todo el espectro frecuencial.

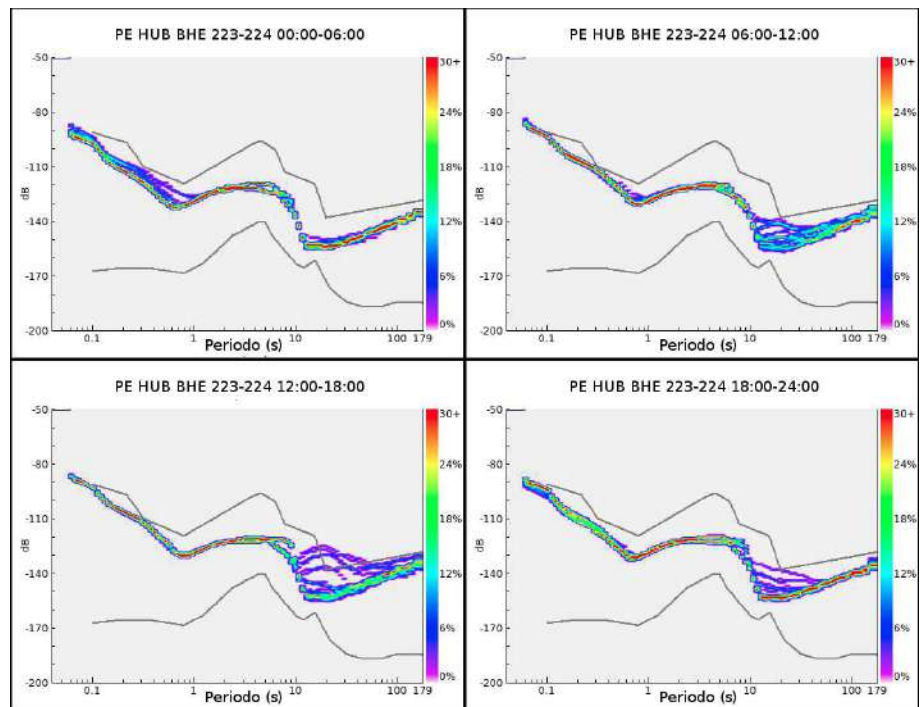


Figura 6.21: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación HUB.

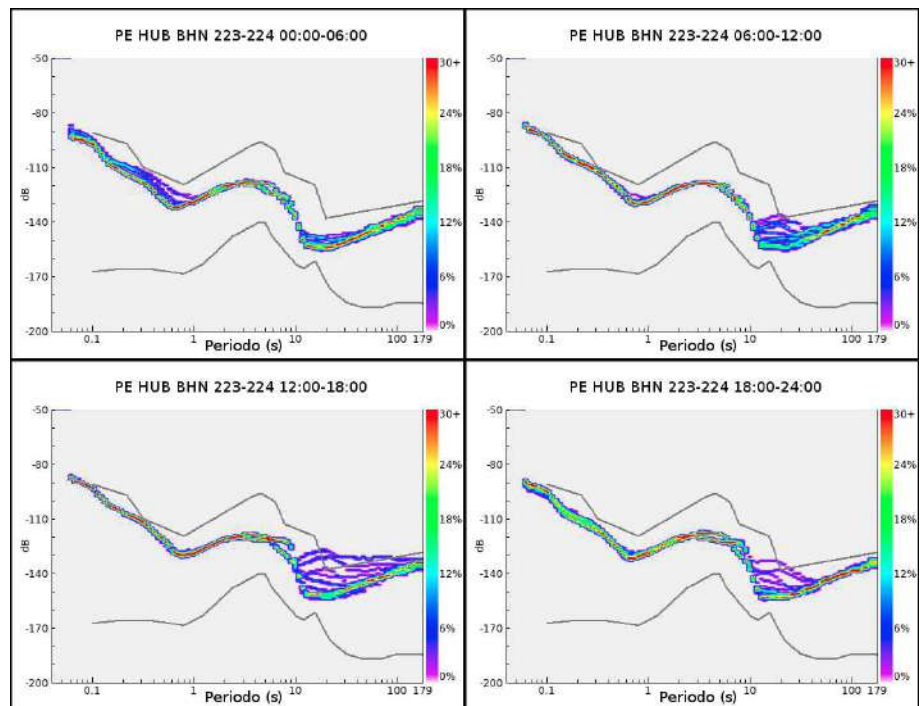


Figura 6.22: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación HUB.

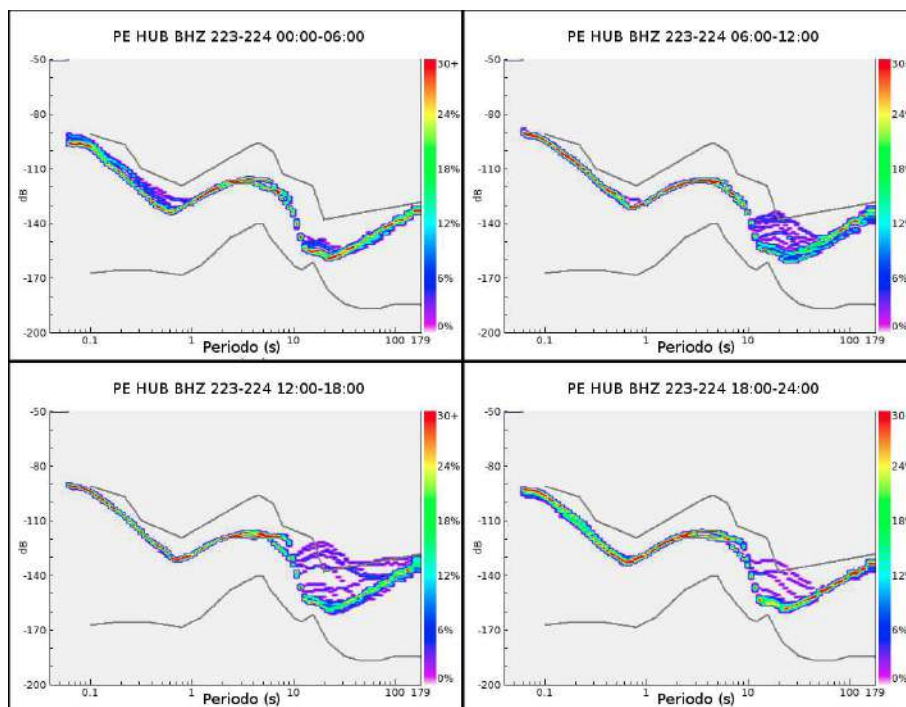


Figura 6.23: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación HUB.

6.2.5.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio de la primavera y del invierno. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registros en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.24. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al inicio de la primavera (21 de setiembre) y a la derecha al inicio del invierno (22 de junio). En orden véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve que no se percibe variación estacional del ruido sísmico para las bandas de periodo largo ni las de periodo corto, en ninguna de las componentes. De igual manera, la variabilidad es igual en todos los casos.

Por otro lado, la banda de microsismos oceánicos muestran, en ambos casos, valores similares; sin embargo, entre los periodos 8-10 s se nota un aumento de ~5 dB para el invierno.

Además, es notorio el cambio del periodo dominante hacia uno más largo. Este cambio es relacionado con el incremento de la actividad oceánica de tormentas en el Pacífico durante el invierno (Ardhuin et al., 2011).

La banda de microsismos oceánicos primarios no se llega a distinguir en ninguno de los casos.

La componente BHZ es ligeramente inferior a sus contra-partes horizontales, tanto en la banda de periodos largos como cortos.

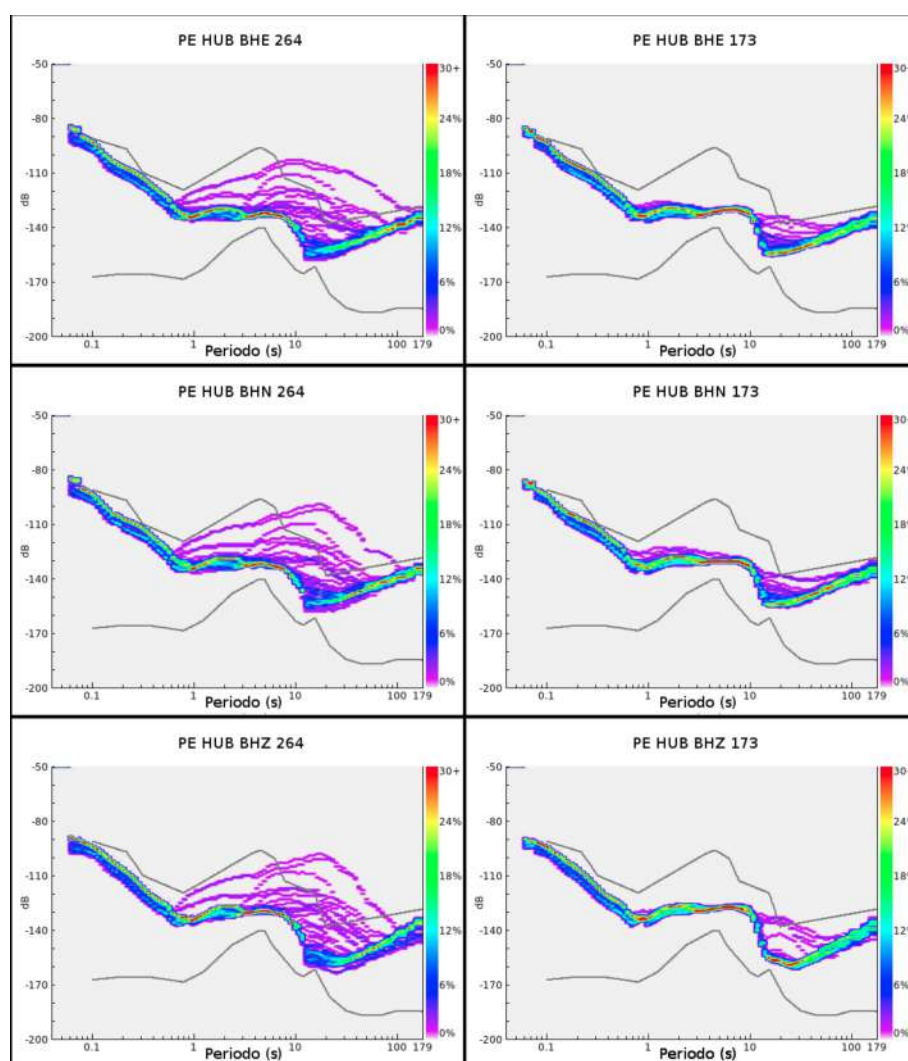


Figura 6.24: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación HUB. A la izquierda los PDFs correspondientes al inicio de la primavera (21 de setiembre) y a la derecha los correspondientes al inicio del invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.2.6 Estación Quirihuac (QRHC)

La estación sísmica Quirihuac, esta ubicada en el distrito de Laredo, provincia de Trujillo, departamento de La Libertad. Esta localizada en las coordenadas geográficas: 8.07°S, 78.85°O, a una altitud de 242 m.s.n.m. y a 22 km de la línea de costa.

Demográficamente, Trujillo es la tercera provincia con el mayor índice de densidad poblacional (537 *habitantes/km²*). A su vez, la estación se encuentra a 19 km al este de la ciudad de Trujillo, la que cuenta con una población de 799,500 *habitantes* .

6.2.6.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.25 presenta la geología local en el entorno de la estación Quirihuac, la misma que se encuentra instalada sobre Depósitos Cuaternarios de tipo Aluvial. Estos depósitos son gravas y arenas mal clasificadas de poco espesor y sobreyacen un stock de composición granítica de edad cretácica (Cossio y Jaen, 1967).

6.2.6.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo Semi-cálido (Sub-tropical). En general, presenta temperaturas cálidas y alto grado de humedad. Las precipitaciones son escasas o nulas.

La estación meteorológica de Trujillo, ubicada a 13 km al OSO de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van desde los 30 hasta los 20°C para el verano, y de los 27 hasta 15°C para el invierno. Los vientos presentan velocidades de 4 hasta 11m/s , con dirección preferencial hacia el oeste.

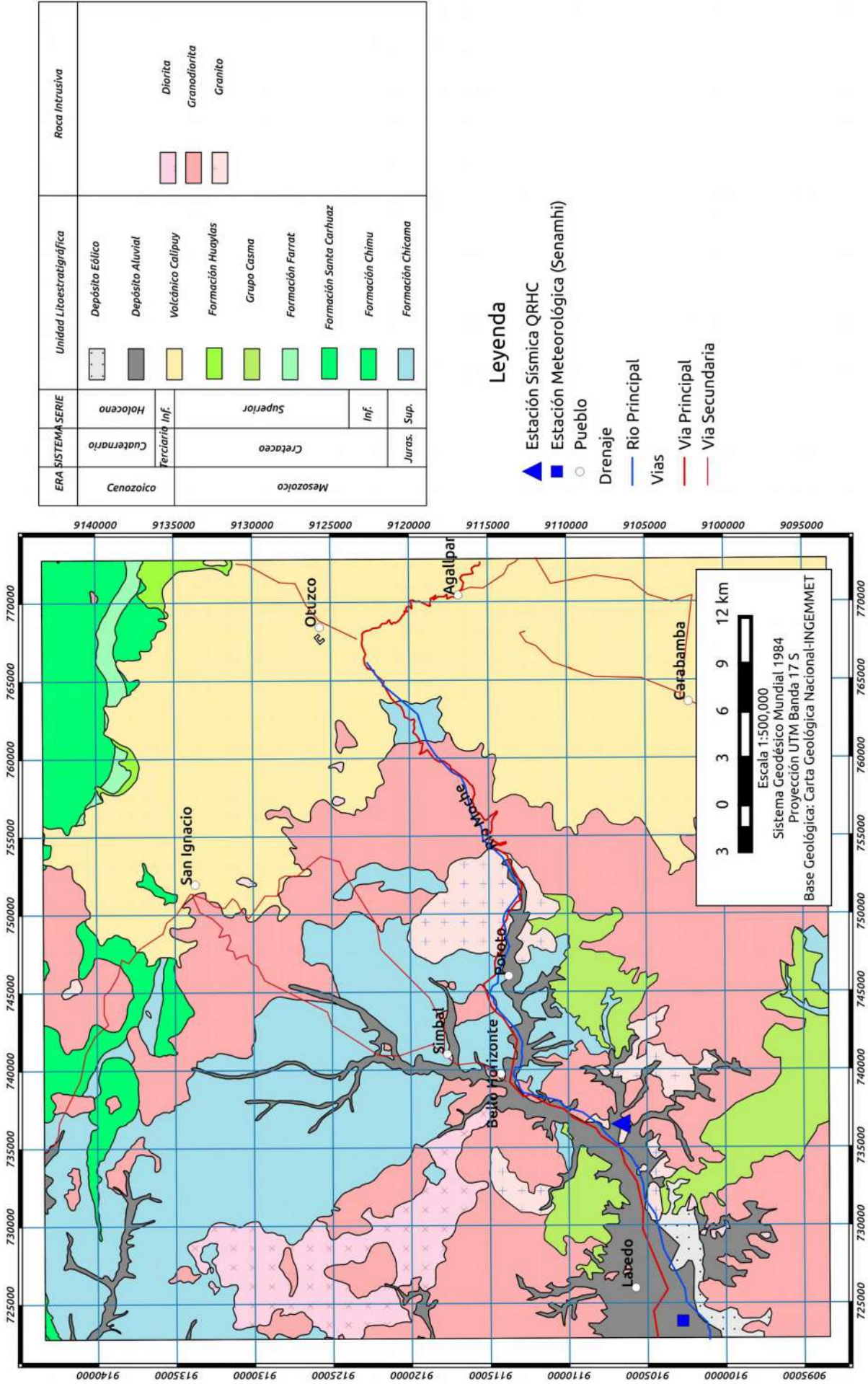


Figura 6.25: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica QRHC.

6.2.6.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Quirihua se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.26, 6.27 y 6.28 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico son relativamente buenos con respecto a los límites establecidos. A pesar de que el suelo sobre el cual la estación ha sido instalada corresponde a un depósito aluvial, este es de poco espesor y sobreyace a un cuerpo intrusivo, por lo que se espera que la amplificación del ruido no sea muy grande.

Para la banda de periodos cortos (<2 s), el ruido sísmico aumenta ligeramente (<5 dB) para horas diurnas, siendo más notorio en la componente BHZ.

Para la banda de periodos largos (>20 s), en las componentes horizontales hay un claro aumento (10 dB) del ruido en las horas diurnas y en la vertical, los niveles de ruido son estables. Este aumento se debe probablemente a que el sensor es afectado por los cambios diurnos de presión y temperatura (Webb, 2002).

La banda de microsismos oceánicos secundarios se mantiene invariante durante todo el día; además, es idéntica en las tres componentes. Por otro lado, los microsismos oceánicos primarios solo son notorios en BHZ a horas nocturnas, cuando el ruido de periodo largo no lo está opacando.

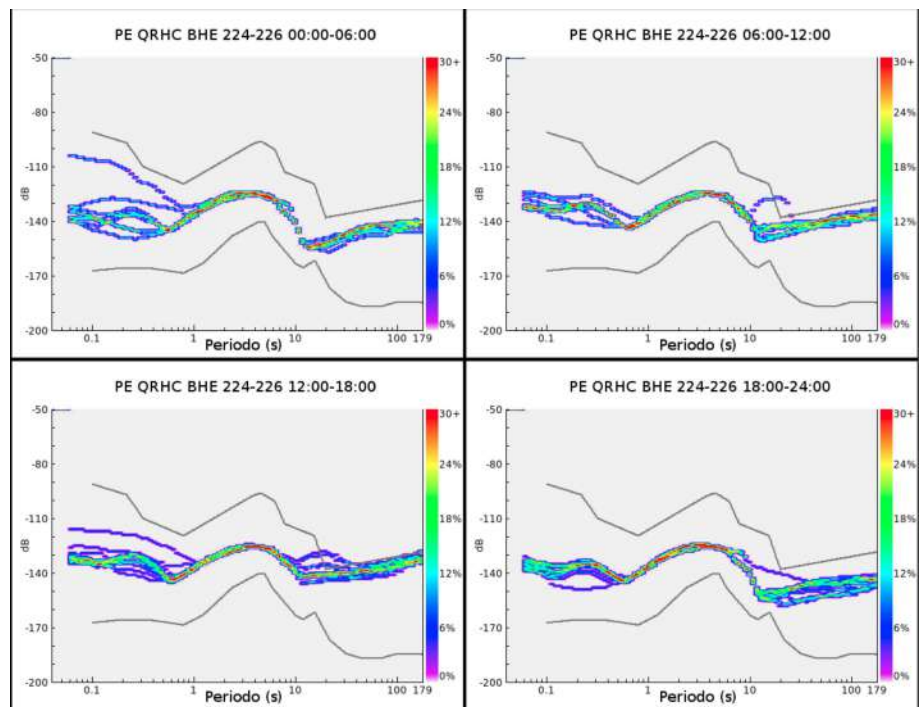


Figura 6.26: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación QRHC.

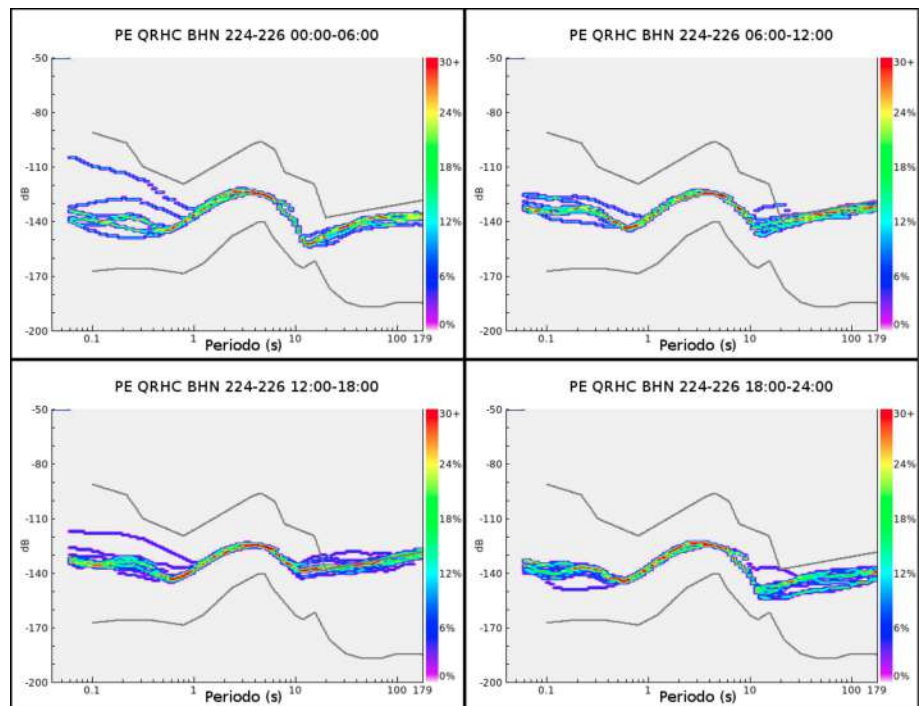


Figura 6.27: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación QRHC.

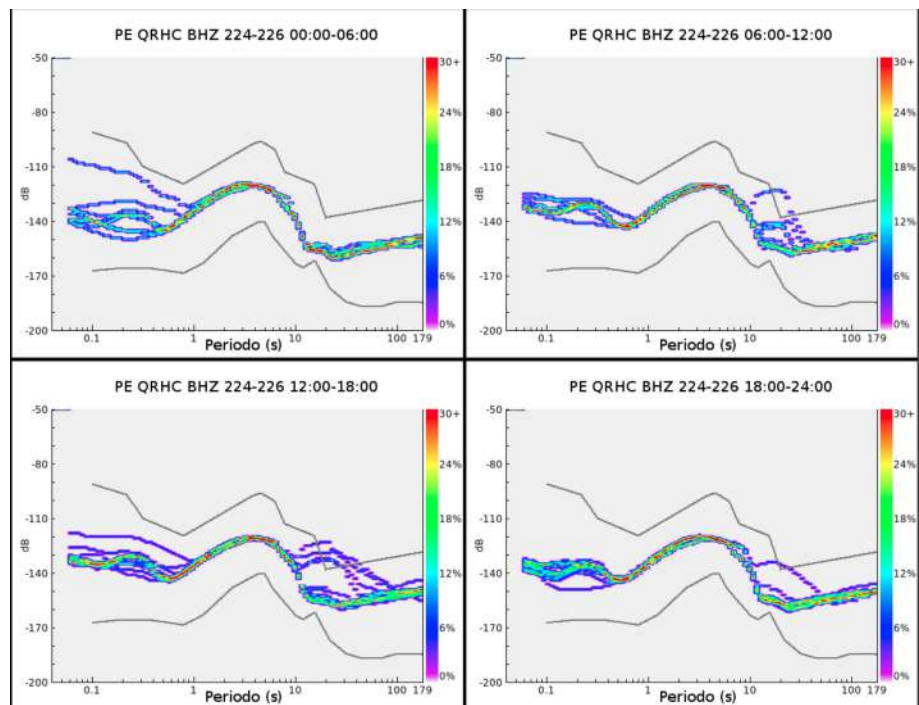


Figura 6.28: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación QRHC.

6.2.6.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.29. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve como el ruido sísmico en la banda de periodos superiores a 20 segundos de las componentes BHE y BHN, es mucho más alto (+10dB) durante el invierno.

Los microsismos oceánicos secundarios muestran una frecuencia dominante entre 2 y 3 s. Este dominio cambia hacia periodos más altos (8-10 s) para el invierno. Este cambio es el mismo en todas las componentes.

La banda de microsismos oceánicos primarios es claramente diferenciable durante el verano en todas las componentes, y en el invierno en BHZ.

Para periodo cortos, la variación no es detectable en ninguna de las componentes.

Adicionalmente, los niveles de ruido de la componente BHZ son similares al de las otras componentes en el verano. Sin embargo, durante el invierno el ruido en BHZ se mantiene constante y es mucho menor que el observado en las componentes BHE y BHN.

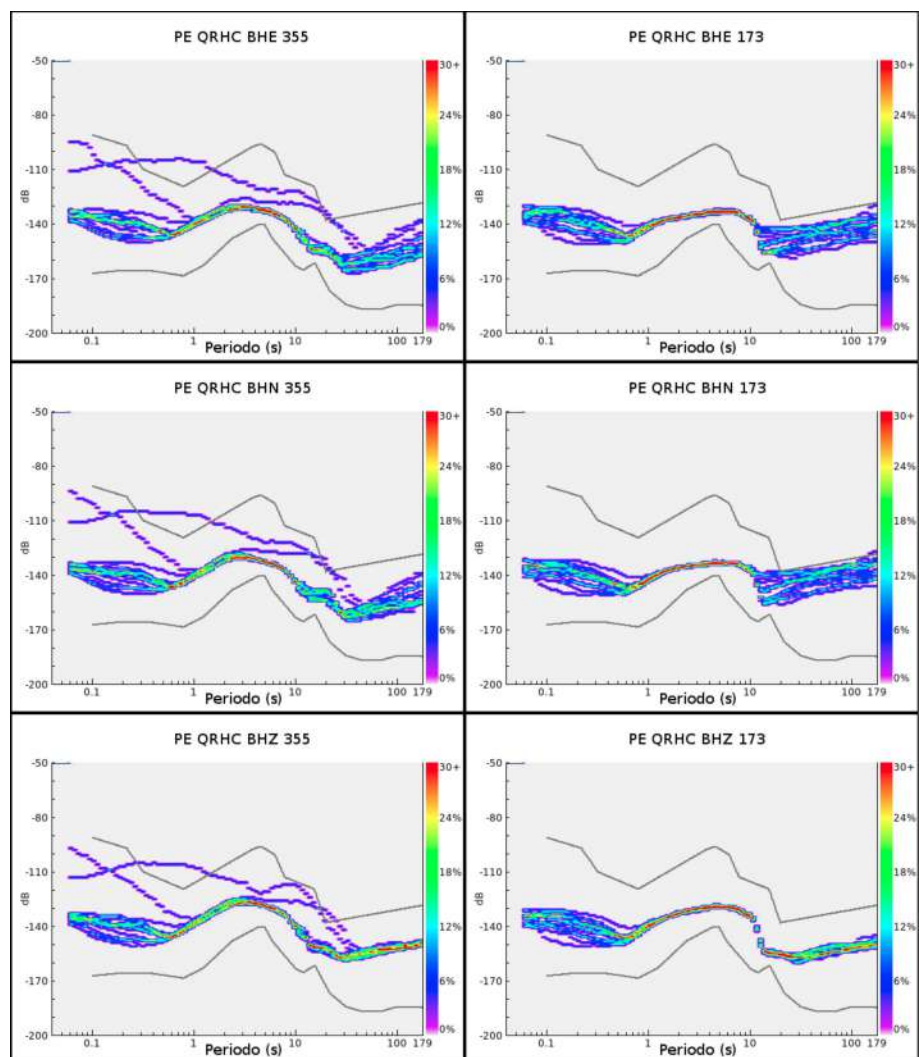


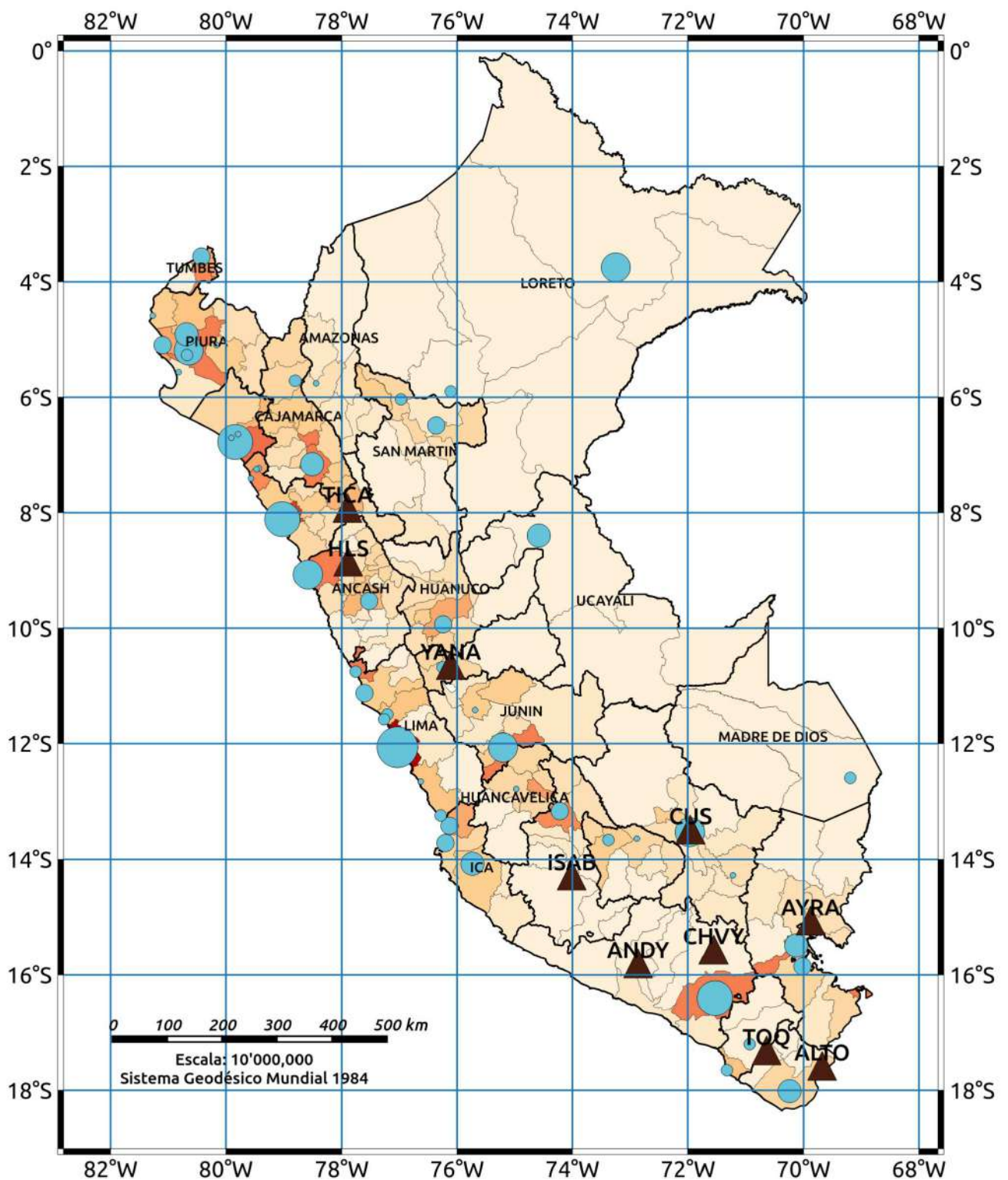
Figura 6.29: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación QRHC. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.3 Estaciones Sísmicas de Arco Continental

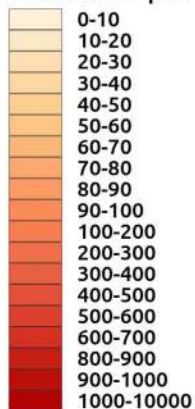
Bajo esta clasificación se encuentran las estaciones ubicadas en las zonas elevadas del Perú, entre 2600 y 4300 m.s.n.m. Además, a distancias con respecto a la línea de costa entre 80 y 350 km. En la Tabla 6.2, se presentan sus coordenadas geográficas, elevaciones y distancias con respecto a la línea de costa. El Mapa de la Figura 6.30 muestra la distribución espacial de estas estaciones, junto con las ciudades más pobladas del país y el índice de densidad poblacional por provincias.

Tabla 6.2: Estaciones de Arco Continental

NOMBRE	COD	LAT (°)	LON (°)	ELEV (msnm)	DIST COSTA(km)
Toquepala	TOQ	-17.30	-70.64	2685	90
Andaray	ANDY	-15.79	-72.86	3046	77
Huaylas	YLS	-8.84	-77.89	3112	78
Ticapampa	TICA	-7.91	-77.90	2817	123
Yanacancha	YANA	-10.63	-76.11	4021	167
St.Isabel de Chapa	ISAB	-14.27	-74.01	3798	178
Chivay	CHVY	-15.55	-71.56	3768	159
Alto Perú	ALTO	-17.57	-69.68	4338	120
Ayrampuni	AYRA	-15.05	-69.88	3853	300
Cusco	CUS	-13.48	-71.96	3864	350



Personas por km²



▲ Estación Sísmica

Ciudades más pobladas

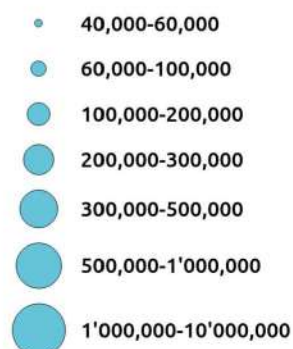


Figura 6.30: Distribución Espacial de Estaciones Sísmicas de Arco Continental de la REDSSAT.

6.3.1 Estación Toquepala (TOQ)

La estación sísmica Toquepala se encuentra instalada en el distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna. Se ubica en las coordenadas geográficas: 17.30°S, 70.64°O, a una elevación de 2685 m.s.n.m. y a 90 km de la línea de costa.

Demográficamente, la provincia de Jorge Basadre tiene una densidad poblacional de 3.3 *habitantes/km²*. Moquegua es la ciudad populosa más cerca, cuenta con 60,572 *habitantes*, y esta a 35 km al ONO de la estación. Además, la mina Toquepala se encuentra a 6 km al NE.

6.3.1.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.31 presenta la geología local de los alrededores de la estación Toquepala. La estación sísmica ha sido instalada sobre la Formación Quellabeco, en el miembro conocido como Serie Alta. La litología es de rocas volcánicas de composición riolítica con textura porfirítica y fenocristales de cuarzo que destacan en una matriz fina, rosada. Su edad geocronológica se le asigna a la serie del Paleoceno (Bellido, 1979).

6.3.1.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo Semi-seco frío. Este clima, en general, es húmedo y frío con precipitaciones escasas.

Según los datos de la estación meteorológica Yacango, ubicada a 34 km al NO de la estación sísmica, la temperatura máxima y mínima varía de 27°C a 8°C para el verano y de 25°C a 7°C en el invierno. Los vientos se mueven con una dirección preferencial suroeste y velocidades que varían de 4 a 6m/s.

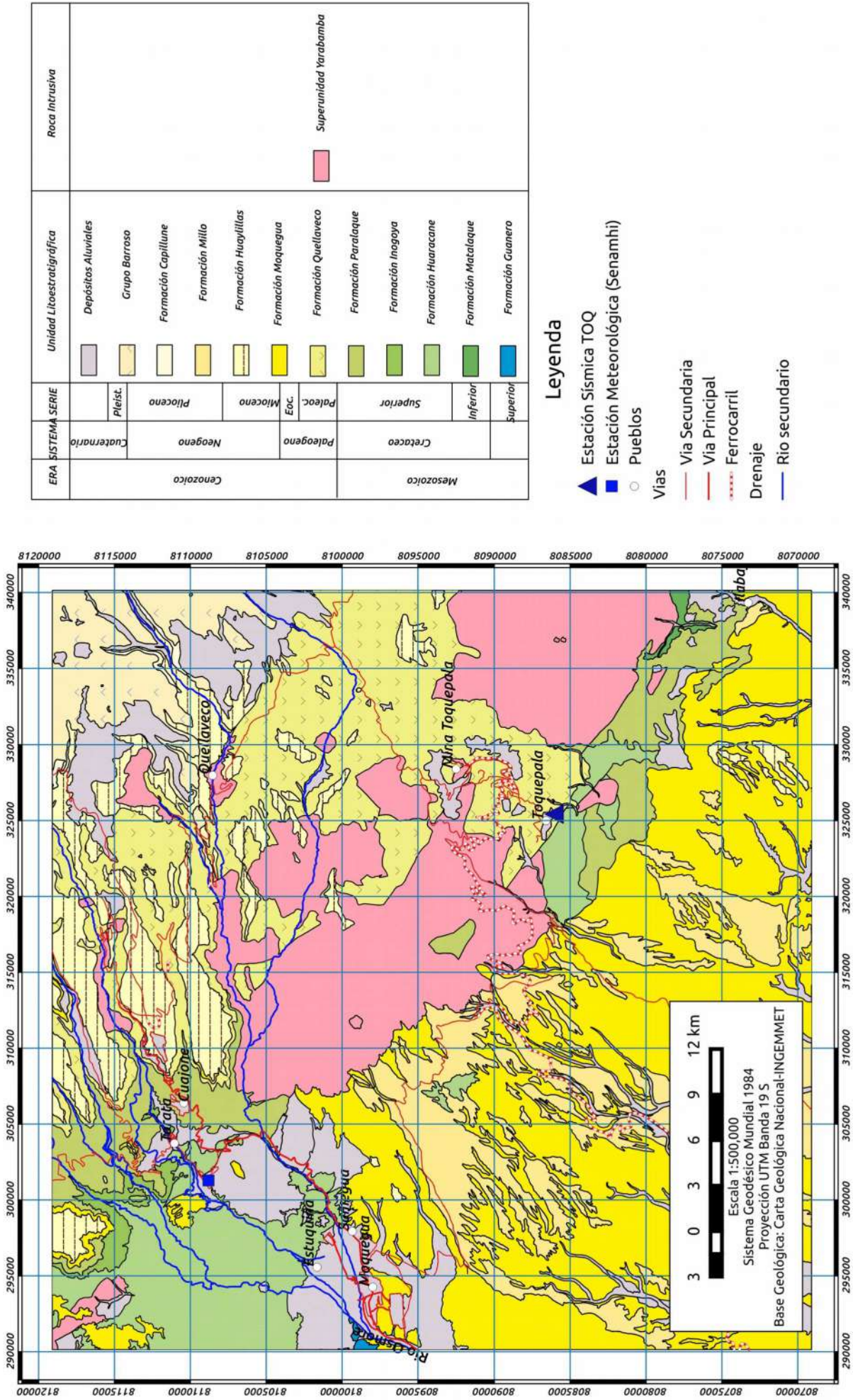


Figura 6.31: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica TOQ.

6.3.1.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Toquepala se seleccionó el registro del día 14 de agosto. Seguidamente, este registro fue dividido en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.32, 6.33 y 6.34 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico son aceptables a lo largo de todo su espectro frecuencial, tanto en horas diurnas como nocturnas. Estas condiciones se deberían al tipo de roca (flujos riolíticos) sobre la cual se instaló la estación.

Para la banda de periodos cortos (<2 s), los niveles de ruido sísmico en todas las componentes muestran un aumento mínimo (<2 dB) durante los intervalos diurnos. Estas variaciones se dan debido a la actividad en la mina Toquepala.

Para la banda de periodos largos (>20 s), en las componentes horizontales el ruido varía ligeramente, siendo menor durante las horas 18:00-24:00. En BHZ la variación es más notoria y podría deberse a que los cambios locales de presión atmosférica son verticales y no por turbulencia (Zürn y Widmer, 1995).

La banda de microsismos oceánicos se mantiene constante durante todo el día, y no varía de una componente a otra.



Figura 6.32 Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación TOQ.

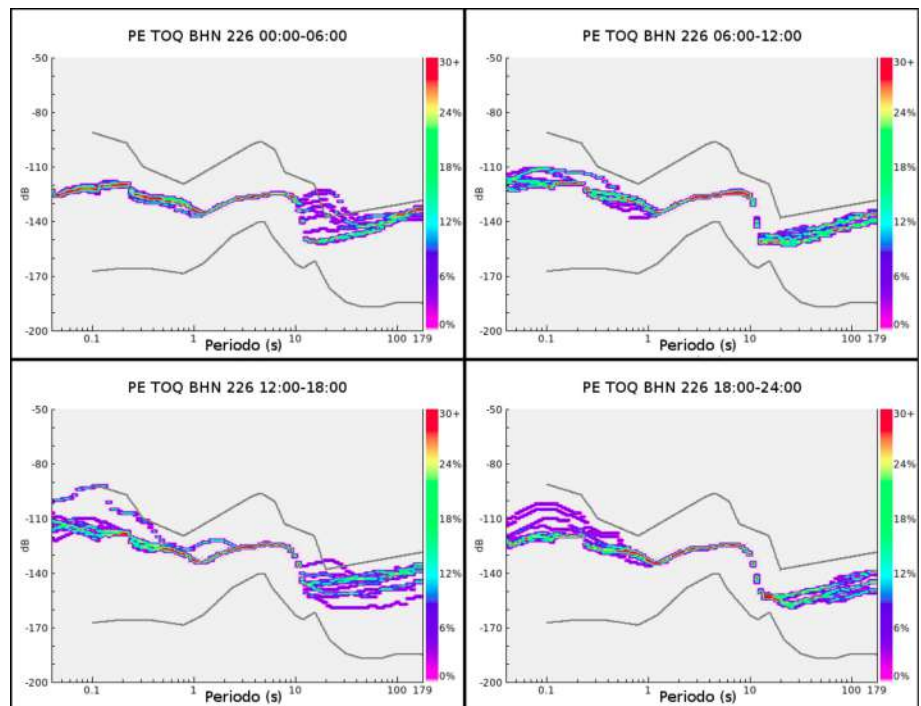


Figura 6.33: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación TOQ.

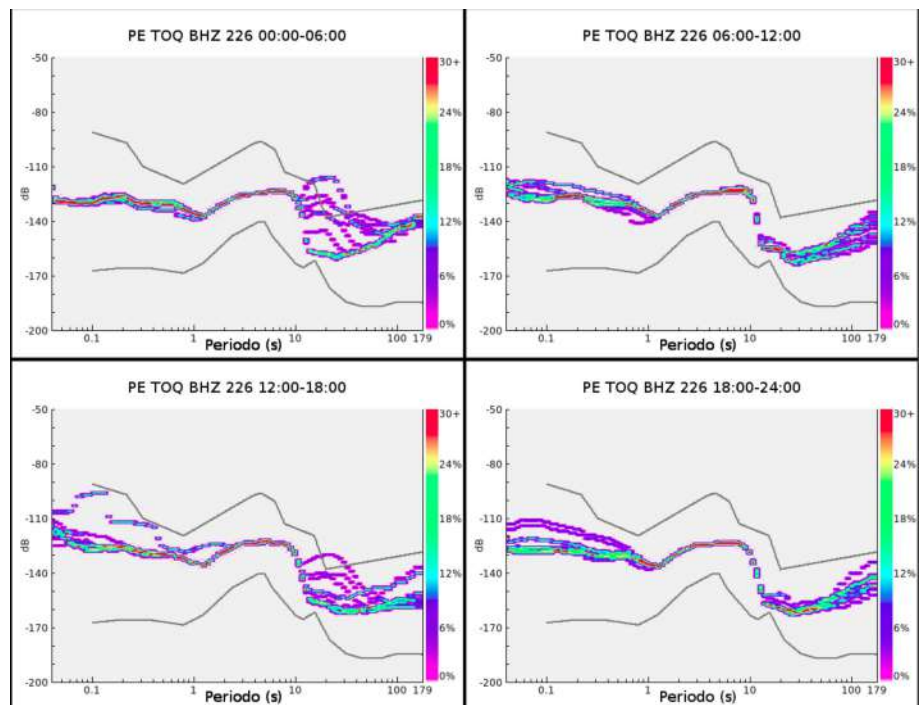


Figura 6.34: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación TOQ.

6.3.1.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.35. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes: BHE, BHN y BHZ.

En general, en las bandas de periodos cortos y largos, los niveles en todas las componentes son prácticamente idénticos, tanto en el verano como en el invierno. Además, en ambos casos la variabilidad es muy alta.

Los microsismos oceánicos secundarios muestran una frecuencia dominante entre 4 y 5 s en el verano; mientras que, para el invierno, este dominio se desplaza hacia periodos más largos (9-10 s). Este cambio está presente en todas

las componentes y probablemente se deba al aumento de la actividad de tormentas en el Pacífico durante el invierno austral, este aumento se ha detectado incluso en redes muy distantes (e.g. Stutzmann et al., 2000)

El pico de microsismos oceánicos primarios solo es diferenciable en el verano en BHZ.

Adicionalmente, los niveles de ruido de la componente BHZ son, a lo largo de todo el espectro, ligeramente inferiores al de las componentes BHE y BHN.

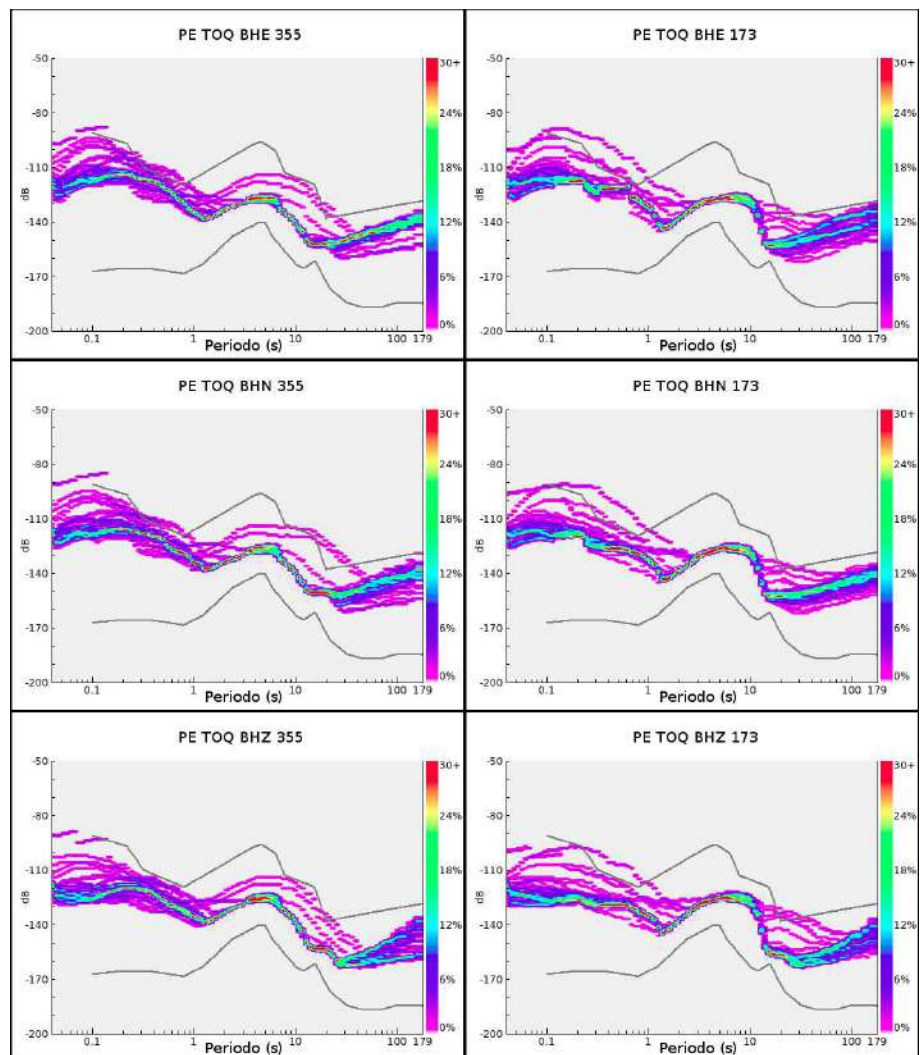


Figura 6.35 Variación Estacional del ruido sísmico en la estación TOQ. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 junio). En orden descendientes son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.3.2 Estación Andaray (ANDY)

La estación sísmica Andaray, esta ubicada en el distrito del mismo nombre, provincia de Condesuyos, departamento de Arequipa. Esta localizada en las coordenadas geográficas: 15.79°S, 72.86°O, a una altitud de 3046 m.s.n.m. y a 77 km de la línea de la costa.

Demográficamente, la provincia de Condesuyos presenta una densidad poblacional de 2.6 *habitantes/km²*. Andaray cuenta con una población de 670 *habitantes*, y Yanaquihua, ubicada a 2.8 km al NO de la estación, cuenta con una población de 5,820 *habitantes*.

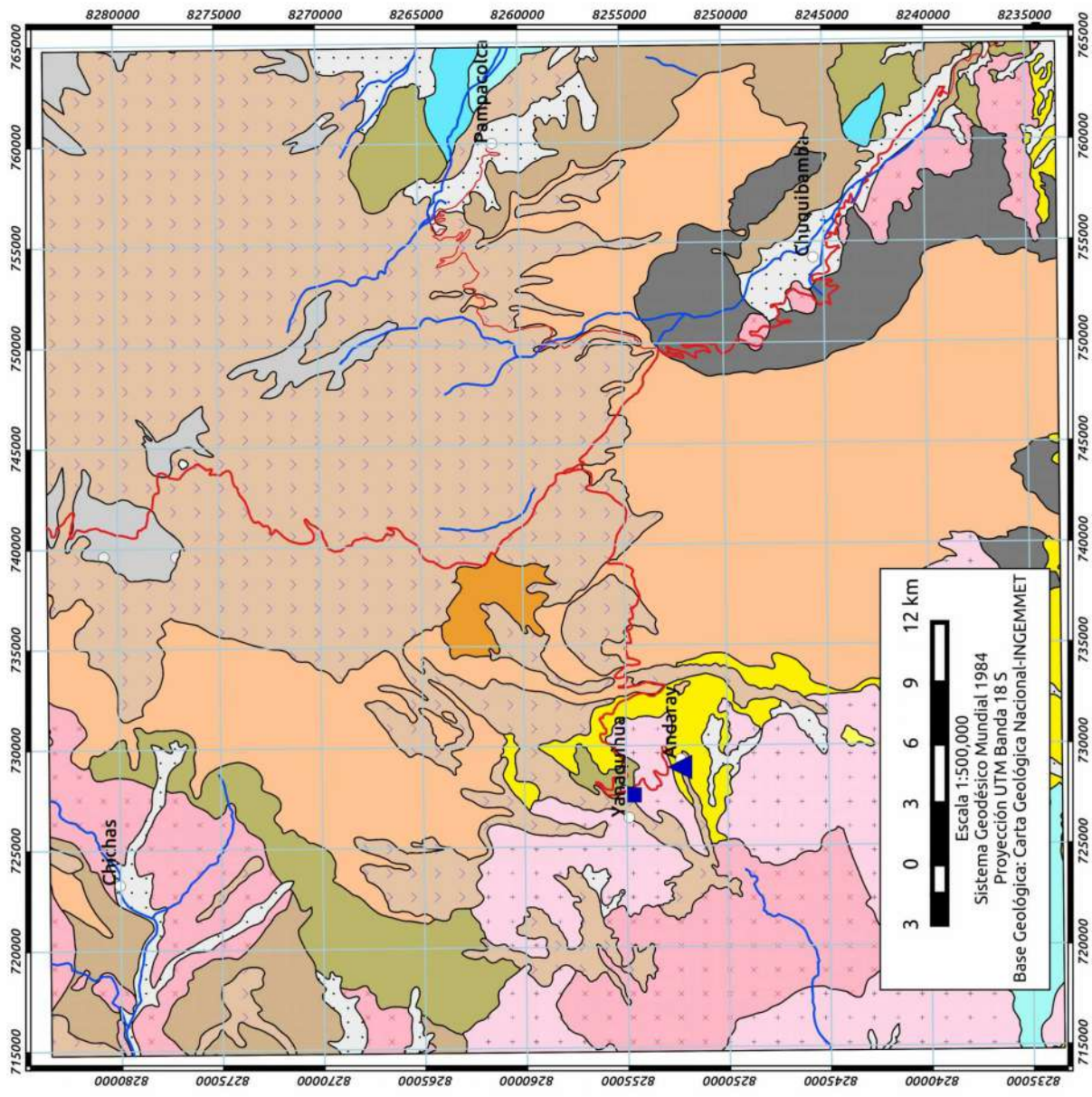
6.3.2.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.36 presenta la geología local de la estación Andaray, la misma que se encuentra instalada sobre rocas de la Formación Moquegua. Litológicamente, es una secuencia de areniscas arcósicas, conglomerados y arcillas no bien consolidadas con un espesor estimado de 200 metros. (Olchanski y Dávila, 1994) y datada al Mioceno. Además, sobreyace las rocas intrusivas de la Super Unidad Incahuasi.

6.3.2.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo Templado-Subhúmedo (de estepas y valles interandinos bajos). En general, es semi-frío y húmedo, con precipitaciones que se encuentran por debajo de los 500 mm anuales.

La estación meteorológica Yanaquihua, ubicada a 4 km al NO de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van desde los 22 hasta los 10°C para el verano, y de los 21 hasta 9°C para el invierno.



Era	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Rocas Intrusivas
Cenozoico	Neógeno	Mioceno	Depósitos Aluviales	Super Unidad Tiabaya Super Unidad Incahuasi
			Depósitos de Deslizamiento	
			Depósitos Morrénicos	
	Plioceno	Grupo Barroso		
		Formación Alpabamba		
	Mioceno	Grupo Tacaza		
		Formación Plisco		
		Formación Moquegua		
	Mesozoico	Jurásico	Grupo Yura	
			Formación Socosani	
Paleozoico	Paleozoico	Paleozoico Indiferenciado		
		Complejo Basal de la Costa		
Precambriico				

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica ANDY
- Estación Meteorológica (Senamhi)
- Pueblo
- Drenaje
- Río secundario
- Vías
- Carretera asfaltada
- Carretera afirmada

Figura 6.36: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica ANDY.

6.3.2.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Andaray se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.37, 6.38 y 6.39 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico se encuentran por debajo de los límites máximos, excepto para periodos largos durante horas diurnas. Este exceso probablemente sea debido a que el sensor puede estar afectado por factores ambientales como la temperatura y/o presión (Gebauer et al., 2010).

Para la banda de periodos cortos (<2 s), se diferencia una variación de hasta 15 dB para los periodos diurnos. Esta variación esta presente en todas las componentes, pero es más notoria en BHZ.

Para la banda de periodos largos (>20 s), los niveles de ruido son altos en BHN y BHE, y mínimos a lo largo del día en la componente BHZ.

En la banda de microsismos oceánicos los niveles de ruido sísmico no varían a lo largo del día en ninguna componente.

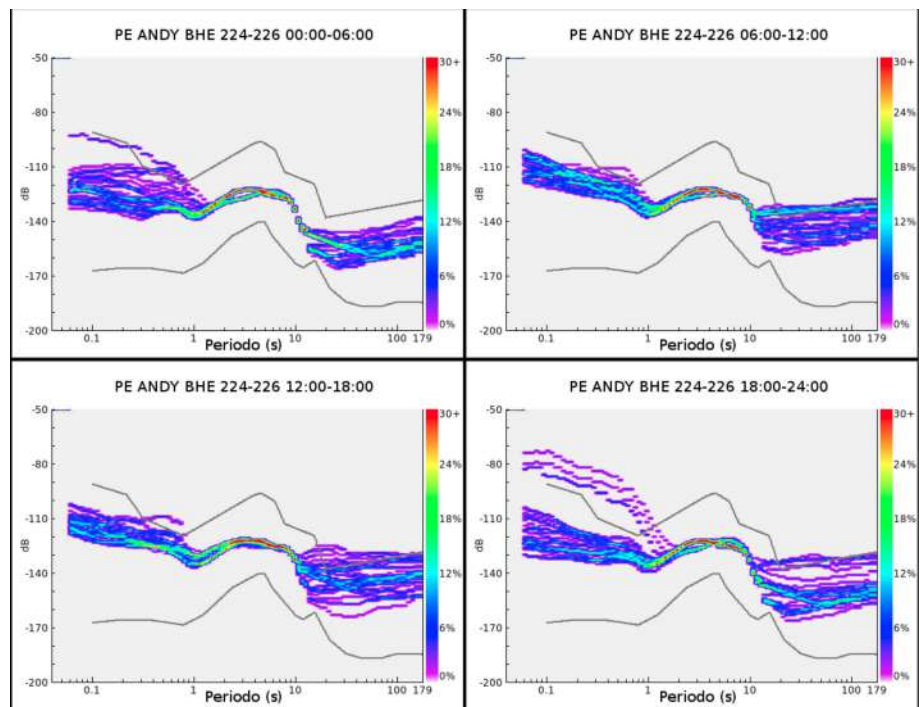


Figura 6.37: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación ANDY.

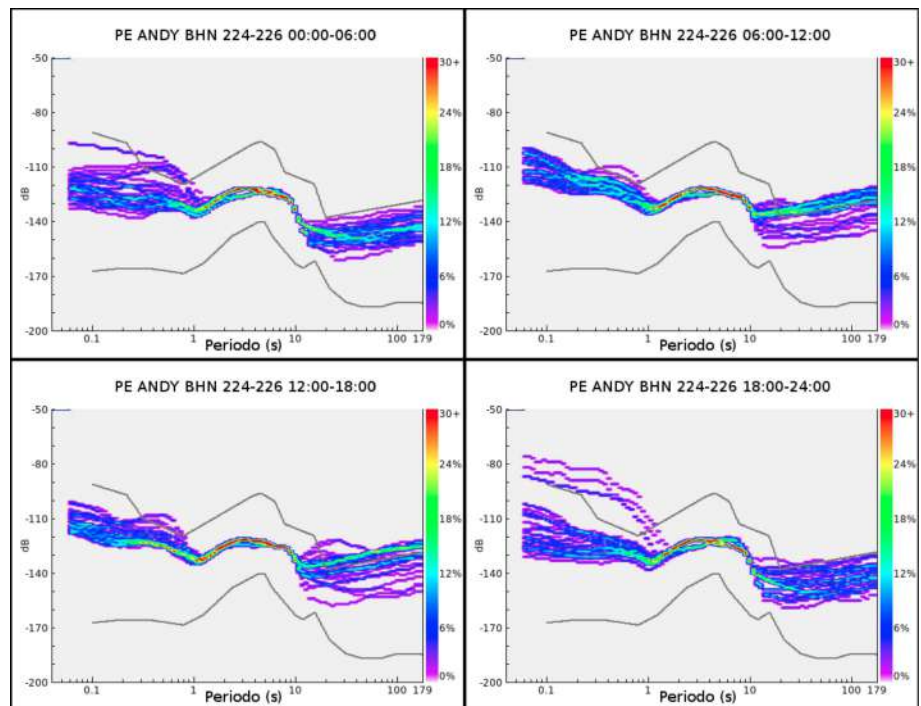


Figura 6.38: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación ANDY.

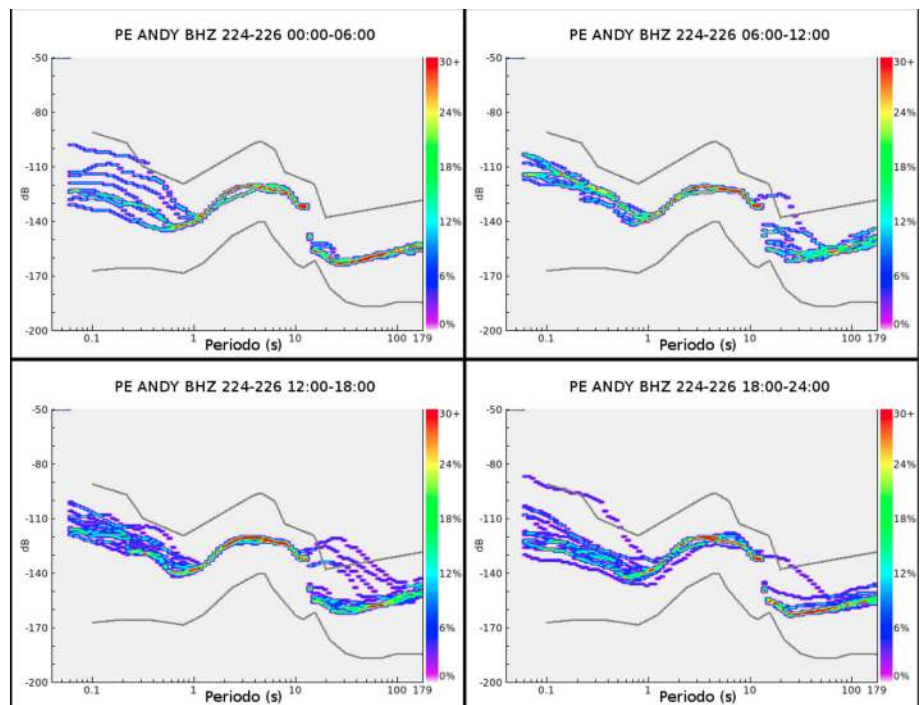


Figura 6.39: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación ANDY.

6.3.2.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.40. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve en las bandas de periodos largos que los niveles en todas las componentes son parecidos, tanto en el verano como en el invierno, ambos muestran amplia variabilidad en los niveles de ruido.

Los microsismos oceánicos secundarios muestran periodos dominantes entre 6 y 7 s. Para el invierno, los niveles anteriores se mantienen, pero para los periodos de 7-10 s aumentan

considerablemente.

Para ruido de periodo corto en ambos casos se presenta niveles parecidos. Sin embargo, para el verano la variabilidad es mayor, lo que hace que se llegue a alcanzar el nivel máximo en algunas ocasiones.

Adicionalmente, los niveles de ruido de la componente BHZ son ligeramente inferiores al de las componentes BHE y BHN a lo largo de todo el espectro frecuencial.

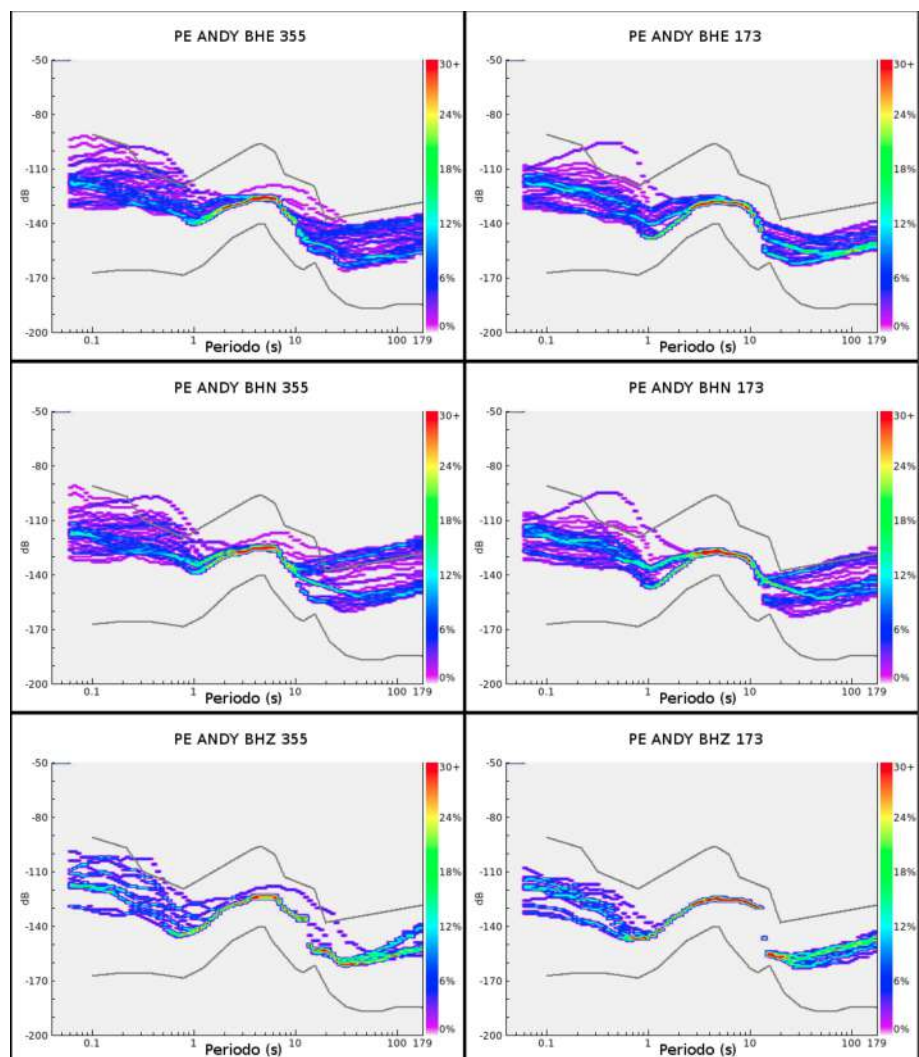


Figura 6.40: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación ANDY. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.3.3 Estación Huaylas (YLS)

La estación sísmica Huaylas se encuentra en el distrito y provincia de Huaylas, departamento de Ancash. Se ubica en las coordenadas geográficas: 8.84°S, 77.88°O, y una altitud de 3110 m.s.n.m.; además, su distancia a la línea de costa es de aproximadamente 78 km.

Demográficamente, la provincia de Huaylas presenta un índice poblacional de $24.7 \text{ habitantes/km}^2$. La ciudad de Huaylas, ubicada a 2.5 km al sur de la estación, cuenta con 1,466 habitantes. Además, la hidroeléctrica Cañon del Pato se encuentra a 5 km al NO de la estación.

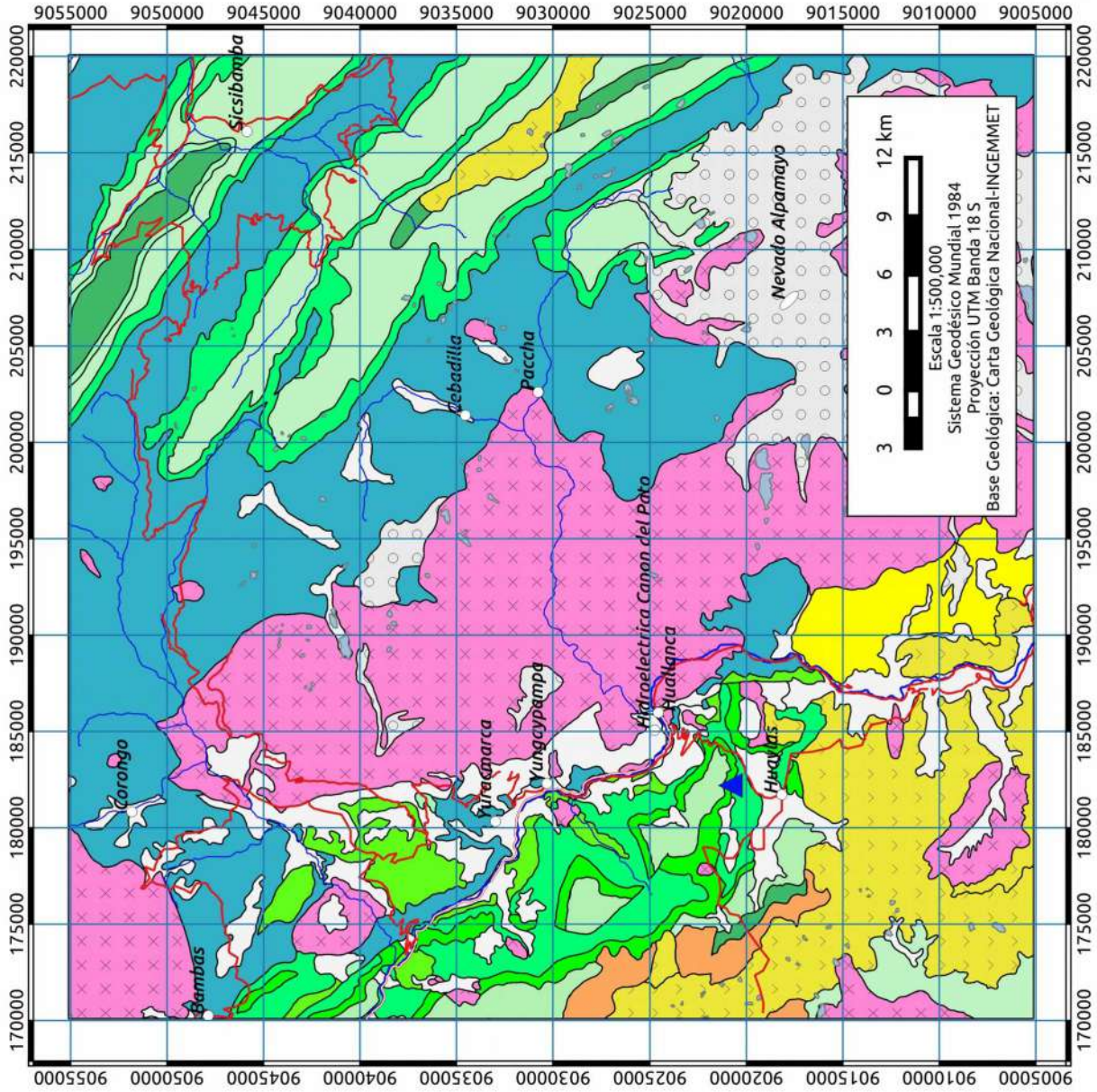
6.3.3.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.41 presenta la geología local de la estación Huaylas, estando instalada sobre rocas de la Formación Santa, la cuales consisten de calizas y arcillitas calcáreas de edad Cretácica inferior (Wilson et al., 1995).

6.3.3.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima semi seco, semi frío, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda.

La temperatura media anual es de 12°C. En verano fluctúa de 8 hasta 22°C; mientras que, en el invierno van de 4 hasta 22°C. Las precipitaciones anuales promedio son de 700 mm. Presenta veranos lluviosos e inviernos secos con fuertes heladas.



ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	UNIDAD INTRUSIVA
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Cuaternario Aluvial	Granodiorita Tonalita
			Depósito Fluvio-glacial	
	Neogeno	Formación Yungay		
Mesozoico	Paleogeno		Volcanico Calipuy	
			Formación Huaylas	
		Sup.	Formación Pariahuanca	
	Cretaceo		Formación Farrat	
			Formación Carhuaz	
			Formación Santa Carhuaz	
			Formación Santa	
	Jurásico		Formación Chimú	
			Formación Oyen	
		Sup.	Formación Chicama	

Legenda

- ▲ Estación Sísmica YLS
- Pueblo
- Nevados
- Vías
- Carretera Principal
- Ferrocarril
- Drenaje
- Río principal
- Río secundario
- Laguna

Figura 6.41: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica YLS.

6.3.3.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Huaylas se tomaron los registros de 5 días de semana (10-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 02:00-08:00, 08:00-14:00, 14:00-20:00, 20:00-02:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.42, 6.43 y 6.44 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico están dentro de niveles aceptables para periodos menores a 20 s; sin embargo, para periodos superiores llegan a ser hasta 20 dB más altos al límite máximo. Esta variación se da debería al efecto de la variación de la presión atmosférica sobre el sensor (Murphy y Savino, 1975).

Para periodos cortos (<2 segundos), la variación del ruido sísmico entre los periodos nocturnos y diurnos se nota en las tres componentes. Esta variación es de una amplitud de hasta 20 dB. Cabe resaltar el comportamiento anormal de la banda 0.2-0.4, el cual es más conspicuo para los periodo diurnos. Esto sugiere un mal funcionamiento del sensor en esa banda.

En el dominio de periodos largos (>20 s), los niveles de ruido son más altos en las componentes horizontales, llegan a superan los niveles máximos durante los periodos diurnos. Para la componente BHZ, los niveles son menores, principalmente durante periodos diurnos.

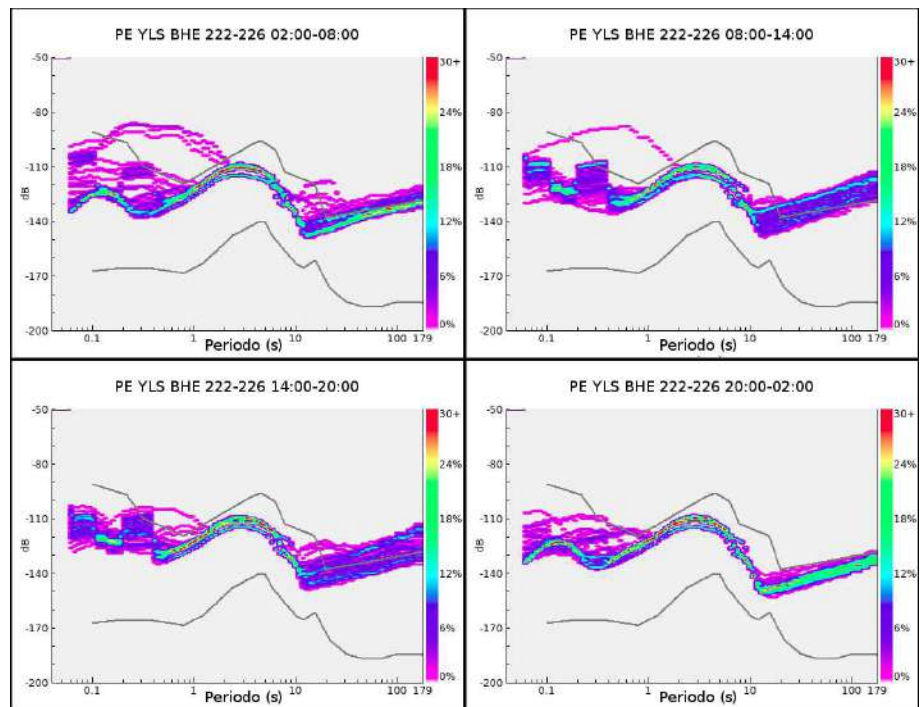


Figura 6.42: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación YLS.

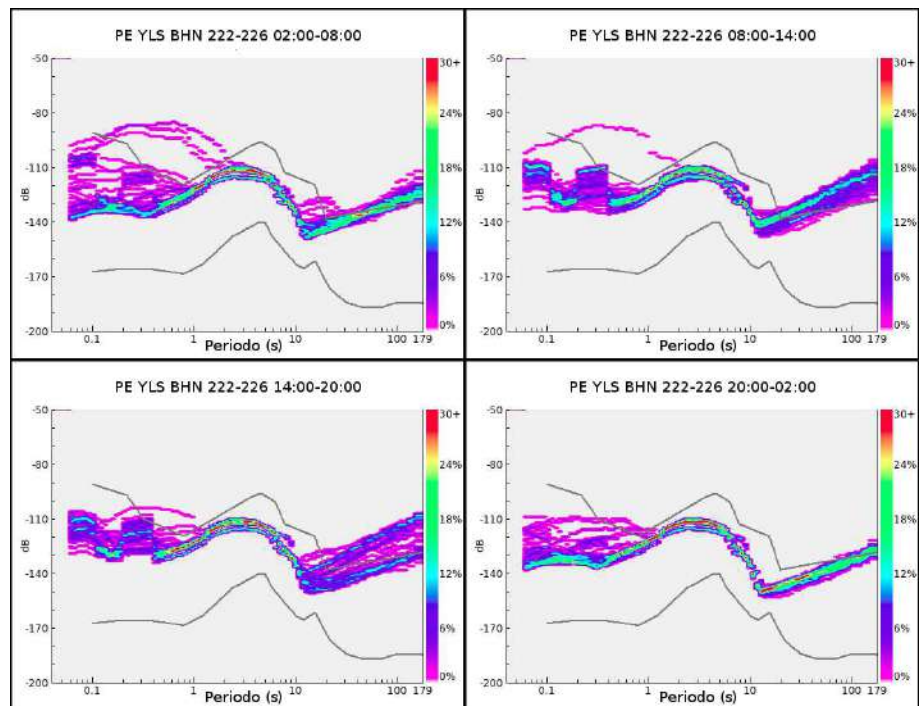


Figura 6.43: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación YLS.

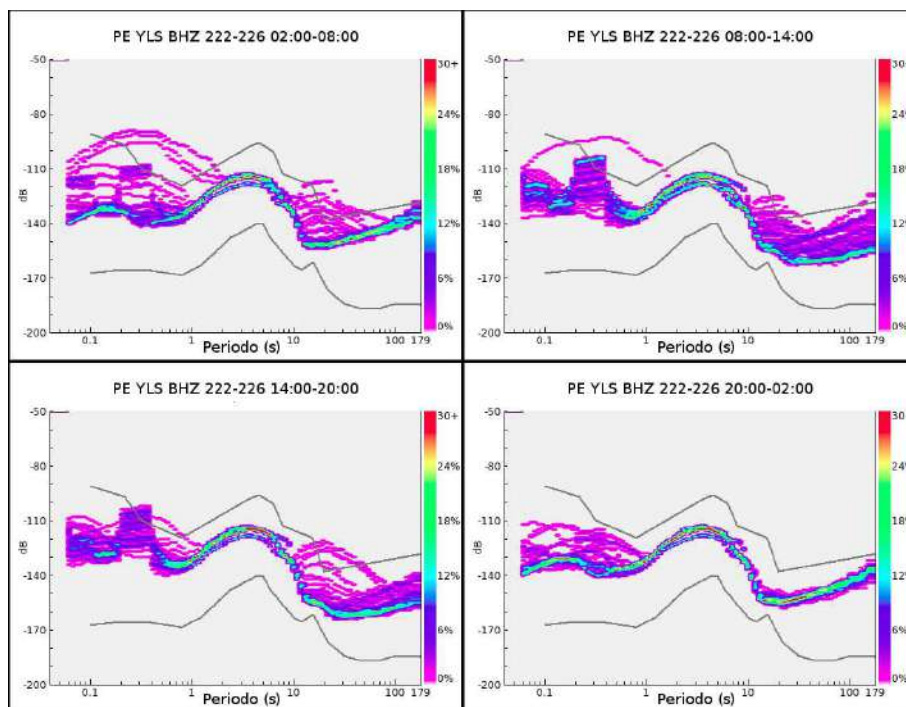


Figura 6.44: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación YLS.

6.3.3.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.45. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve que en las bandas de periodos largos los niveles de ruido en las componentes BHE y BHN son similares y no varían del verano al invierno. En BHZ los niveles son menores al de las componentes horizontales, y tampoco muestra variación estacional (ver Webb, 2002).

Los microsismos oceánicos secundarios muestran una frecuencia dominante entre 2 y 3 s en el verano. Para el invierno, los niveles de ruido

disminuyen considerablemente en la banda 2-8 s, pero aumenta para los periodos 8-10 s. Los microsismos oceánicos primarios solo son distinguibles en BHZ durante el invierno

Para periodos cortos, los niveles son iguales, tanto en el verano como en el invierno. Sin embargo, el fenómeno descrito anteriormente en la banda 0.2-0,4 s es notorio en ambos casos, pero es más persistente en el invierno.

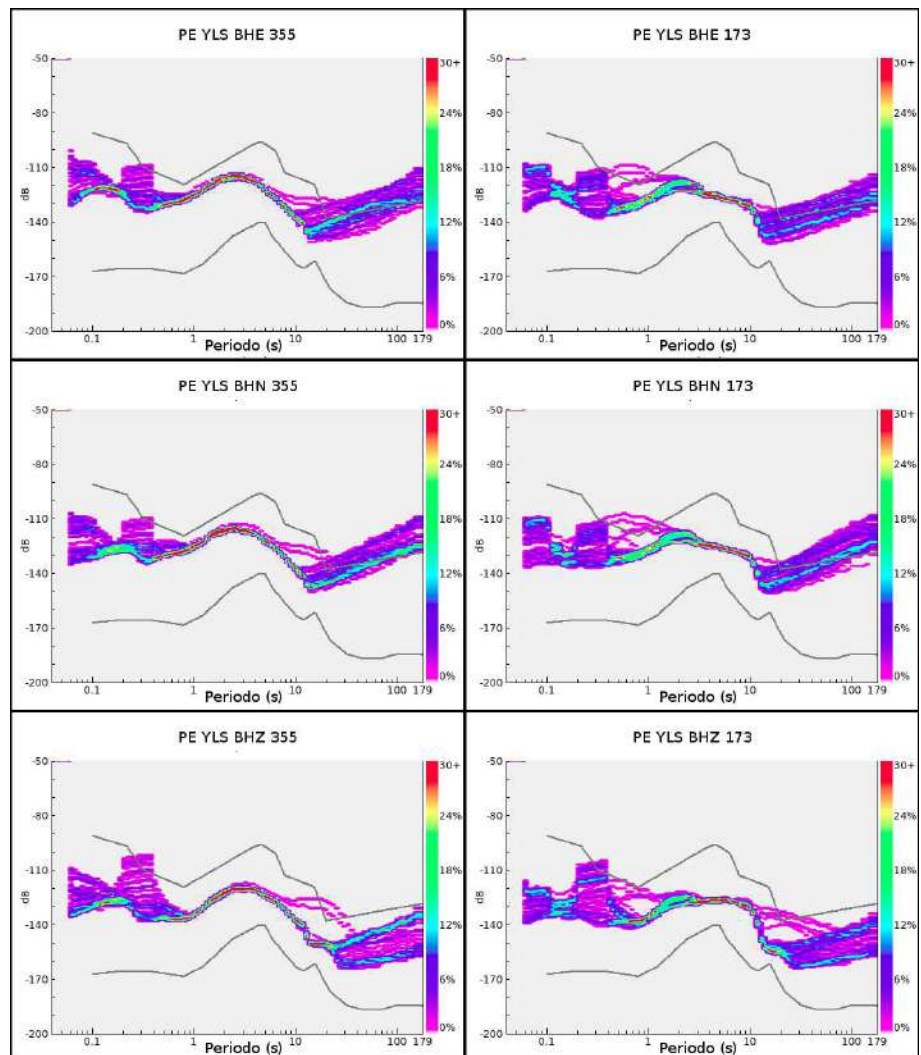


Figura 6.45: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación YLS. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

6.3.4 Estación Ticapampa (TICA)

La estación sísmica Ticapampa, esta ubicada en el distrito de Sarín, provincia de Sanchez Carrión, del departamento de La Libertad. Esta localizada en las coordenadas geográficas: 7.91°S, 77.90°O, y a una altitud de 2817 m.s.n.m; además, esta a 123 km de la línea de la costa.

Demográficamente, la provincia de Sanchez Carrion, tiene una densidad poblacional de 61.7 *habitantes/km²* . Los centros poblados de Sarin y Munmalca, ubicados a 1 y a 6 km, respectivamente, suman una población de aproximadamente 9,500 *habitantes* .

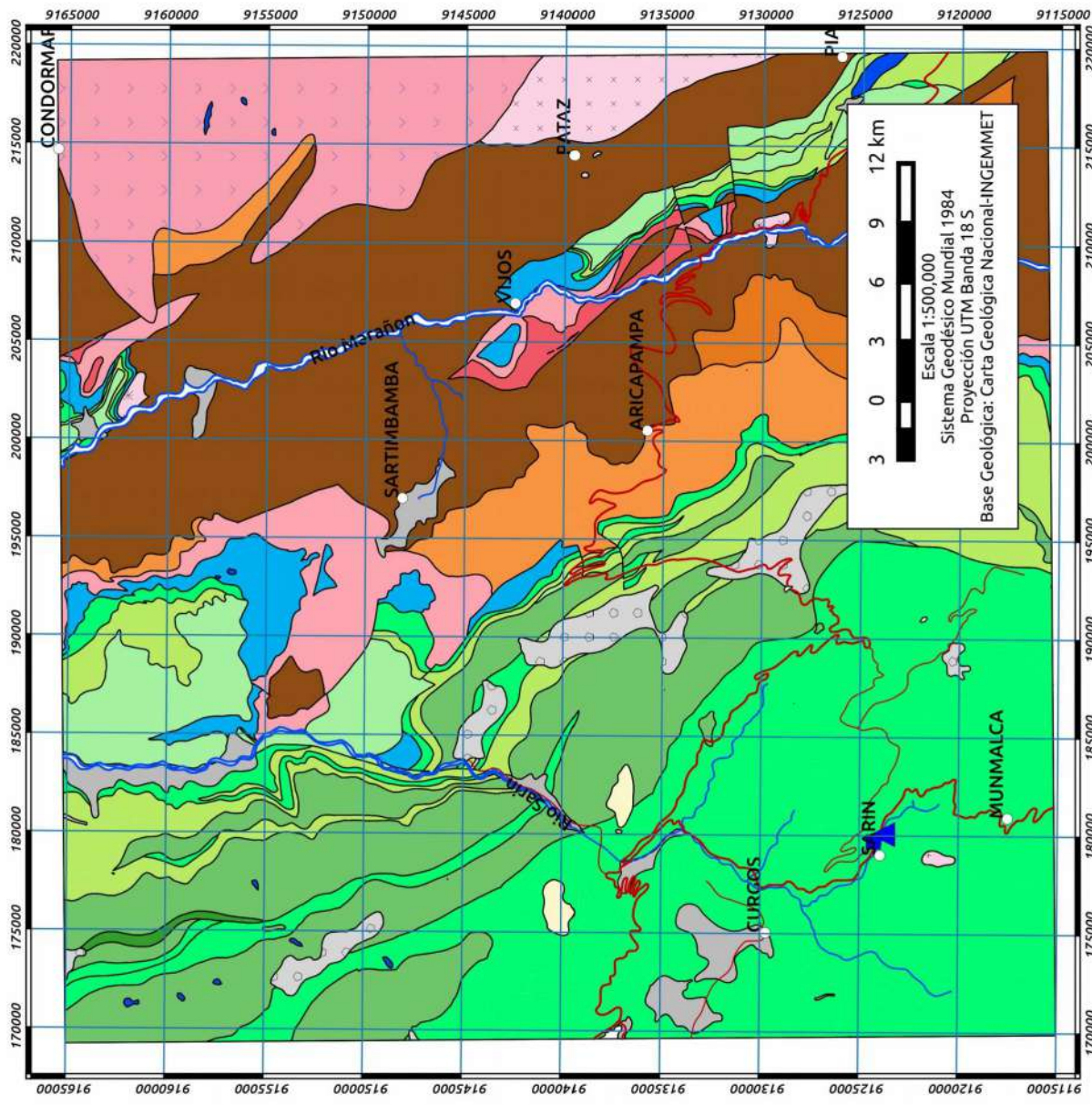
6.3.4.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.46 presenta la geología local de la estación Ticapampa, la misma que se encuentra instalada sobre rocas del Grupo Goyllarisquizga. Específicamente, sobre las Formaciones Inca, Chulec y Pariatambo. Litológicamente, consisten en calizas y lutitas que en grosor alcanzan hasta los 500 m. Estas a su vez sobreyacen la parte basal del Grupo Goyllarisquizga la cual esta compuesta básicamente por areniscas (Wilson y Reyes, 1964). Estas rocas son datadas al Albiano inferior y medio.

6.3.4.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo Semi-seco Frío. En general, es frío y húmedo; además, las precipitaciones anuales suelen estar por debajo de los 500 mm.

La estación meteorológica Ticapampa, ubicada a 618 m al NO de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van desde los 25 hasta los 9°C para el verano, y de 22 hasta 5°C para el invierno. Los vientos no superan los 2 m/s, y tienen una dirección predominante SSE.



ERA	SISTEMA SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva	
Cenozoico	Cuaternario	Depósito Aluvial		
		Depósito Fluvioglacial		
	Terciario	Pleist. Sup.	Formación Condebamba	
Volcánico Lavasen			Diorita Granodiorita	
Medio				
Mesozoico	Cretáceo	Grupo Pullucana		
		Grupo Quilmana		
		Formación Rosa		
		Formación Crisnejas		
		Grupo Goyllarisquizga		
	Jurásico	Sup.	Formación Chicama	
		Inf.	Formación Pucara	
	Paleozoico	Trias. Sup.	Grupo Mitu	
		Sup.	Grupo Copacabana	Granito Rojo
		Inf.	Grupo Ambo	
Precámbrico	Miss.	Formación Contaya		
	Medio	Complejo Marañón		

Legenda

- ▲ Estación Sísmica TICA
- Estación Meteorológica (Senamhi)
- Pueblo
- Vias
 - Via Principal
 - Via Secundaria
- Drenaje
 - Río Principal
 - Río Secundario
 - Laguna

Figura 6.46: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica TICA.

6.3.4.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Ticapampa se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.47, 6.48 y 6.49 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico son aceptables para periodos nocturnos, sin embargo, para horas del día los niveles a periodos largos y cortos suelen superar el límite máximo. Esto podría deberse a la naturaleza sedimentaria del suelo sobre el cual ha sido instalada la estación.

Para la banda de periodos cortos (<2 s), el ruido aumenta hasta en 10 dB en todas las componentes para las horas del día. Si bien este aumento no llega a superar el límite máximo, se encuentra muy cerca, sobre todo en la componente BHZ.

Para la banda de periodos largos (>20 s), en la componente BHZ los niveles son muy buenos, y no varían a lo largo del día; mientras que, en las componentes BHE y BHN hay un aumento de más de 20 dB en horas del día, especialmente entre las 12:00 y 18:00. Estos cambios abruptos podrían deberse a que el sensor es muy susceptible a los cambios ambientales diurnos ya que no está correctamente aislado de estos (ver Savino et al., 1975).

Los microsismos oceánicos presentan niveles estables durante todo el día, que además no varían de una componente a otra.

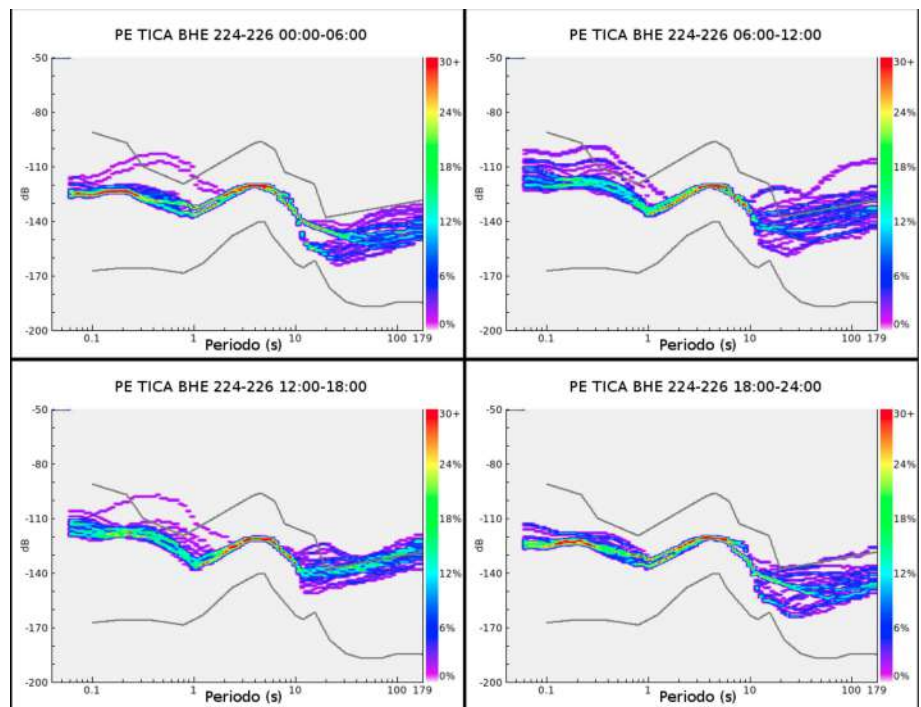


Figura 6.47: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación TICA.

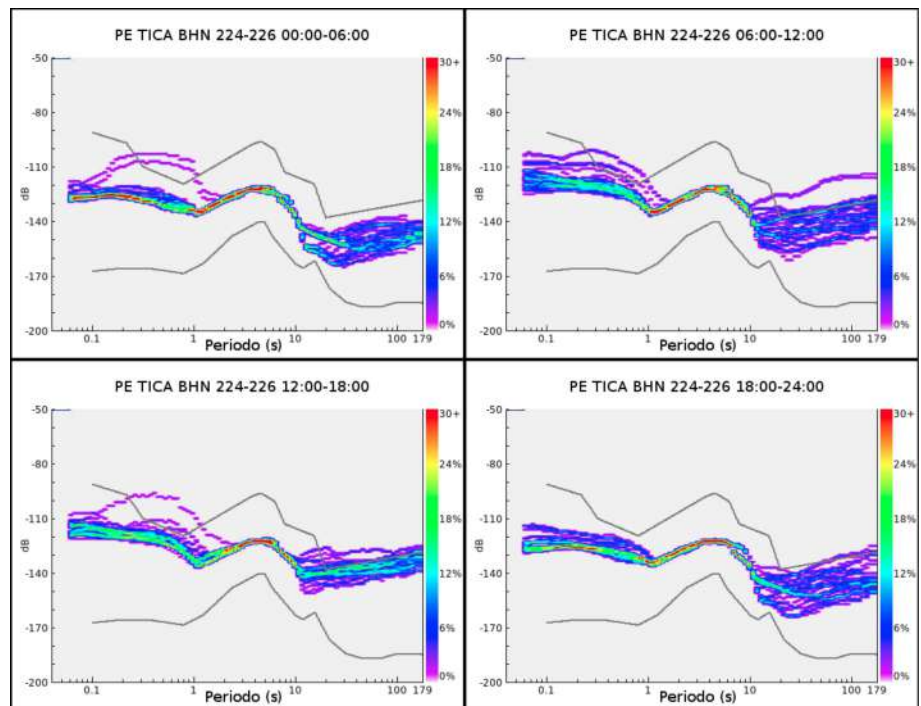


Figura 6.48: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación TICA.

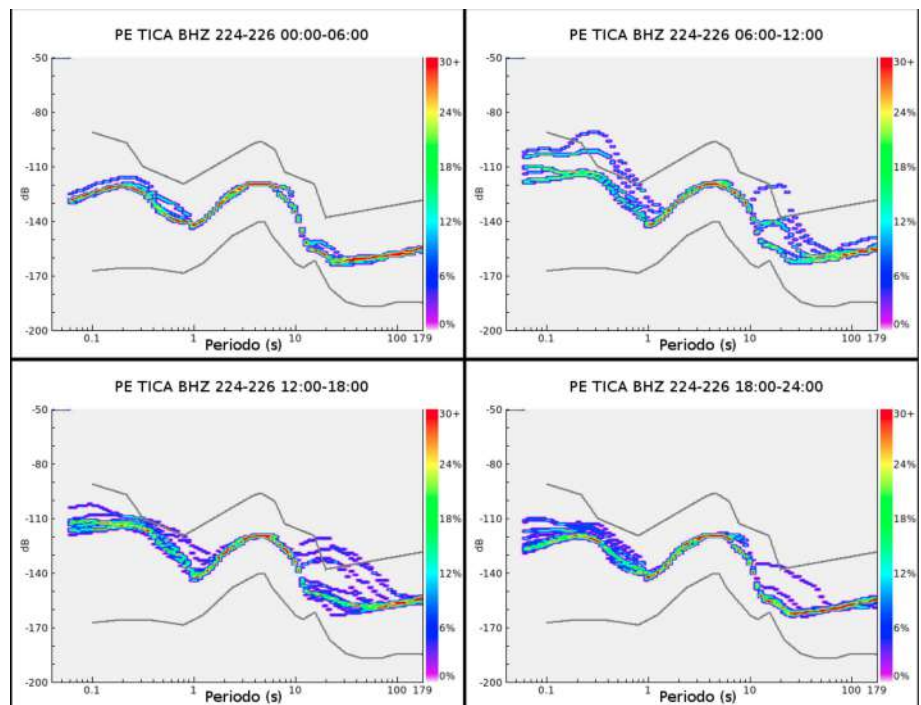


Figura 6.49: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación TICA.

6.3.4.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.50. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve que en la banda de periodos largos los niveles en las componentes BHE y BHN son similares y no varían del verano al invierno. En BHZ, los de ruido niveles son menores y tampoco muestran variación estacional.

Los microsismos oceánicos secundarios muestran un ligero aumento en sus niveles, además, se percibe un cambio de su periodo dominante, el

cual cambia de 4-5 s para el verano a 7-8 s para el invierno.

El pico de microsismos primarios solo es discernible en la componente BHZ, y además, presenta la mismas características, tanto en el verano como en el invierno.

Para periodos cortos, los niveles en todas las componentes son ligeramente superiores en el invierno, llegando a superar el límite máximo por unos cuantos decibelios en la banda de 0.3-0.4 s.

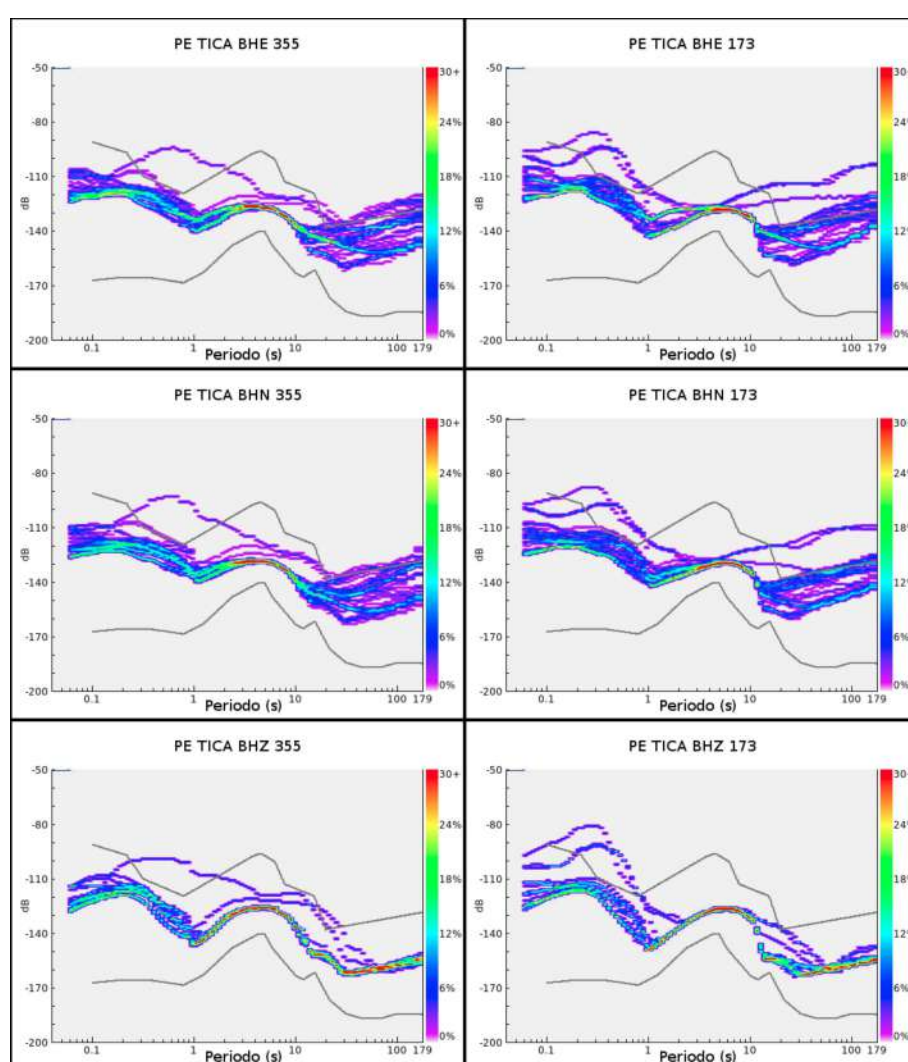


Figura 6.50: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación TICA. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.3.5 Estación Yanacancha (YANA)

La estación sísmica Yanacancha, esta ubicada en el distrito de Ticaclayan, provincia de Pasco, departamento de Pasco. Esta localizada en las coordenadas geográficas: 10.63°S, 74.52°O, y a una altitud de 4021 m.s.n.m.; además, esta a 167 km de la línea de costa.

Demográficamente, la provincia de Pasco, tiene una densidad poblacional de 33.1 *habitantes/km²*. La ciudad de Cerro de Pasco es el punto más poblado más cercano, con 66,000 *habitantes*, esta ubicada a 16 km al ESE de la estación. Además, cabe resaltar la presencia de la mina Yungar, la cual se encuentra envuelta por la ciudad de Cerro de Pasco.

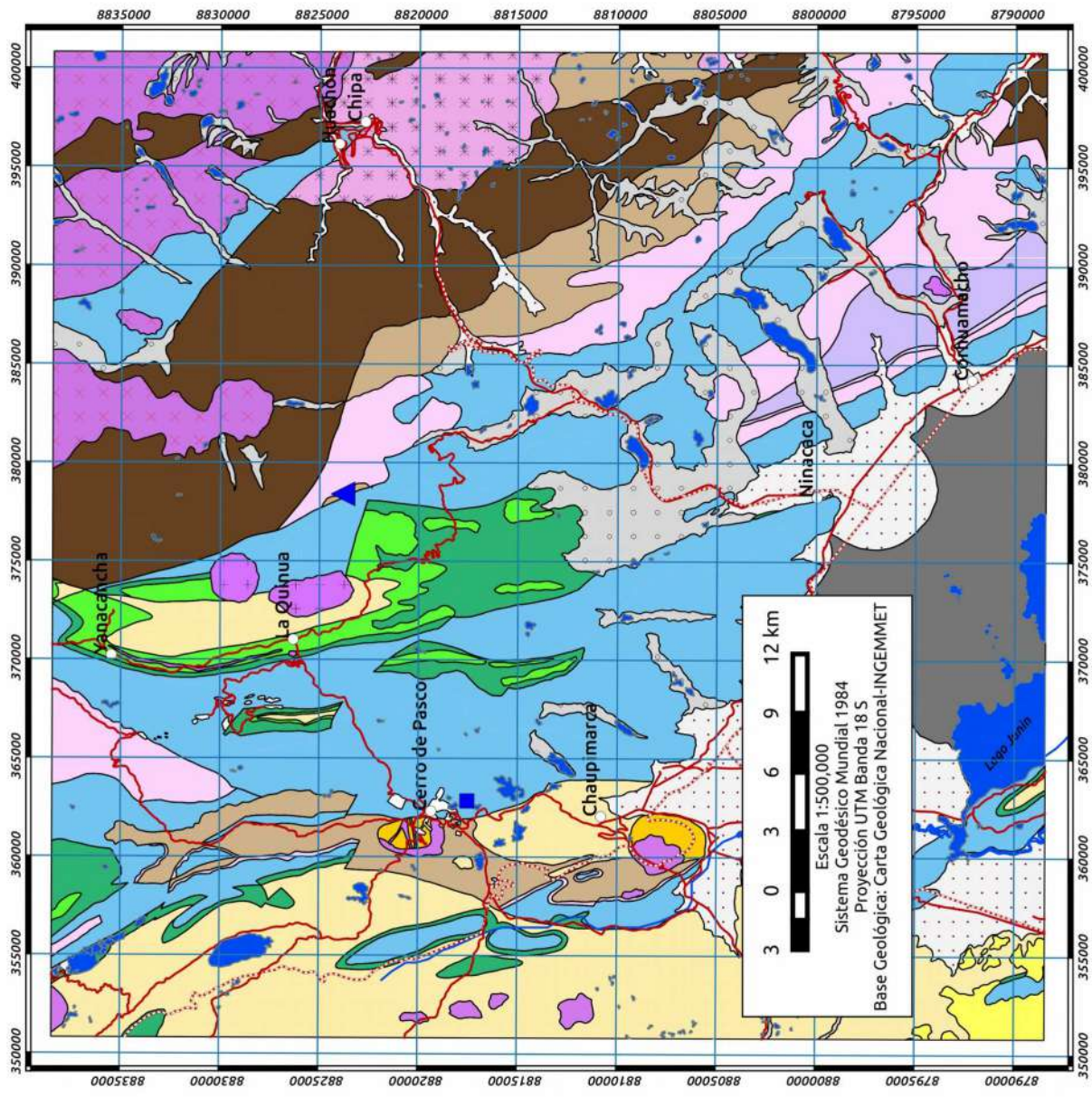
6.3.5.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.51 presenta la geología local de la estación Yanacancha, la misma que se encuentra instalada sobre rocas del Grupo Excelsior, compuestas principalmente por pizarras grises y filitas con areniscas en capas delgadas. Hay muchas venillas de cuarzo presente debido al metamorfismo regional de bajo grado (Cobbing et al., 1996). El espesor no es determinable debido a los abundantes pliegues. Este Grupo es datado al Devónico Inferior.

6.3.5.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima tipo Lluvioso Semi-frío. En general, es frío y húmedo. Además, lluvioso, con precipitaciones anuales de 700 mm.

La estación meteorológica Cerro de Pasco, ubicada a 16 km al OSO de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van desde 13 hasta 1°C para el verano, y de 12 hasta -3°C para el invierno. La velocidad de los vientos va desde 2 hasta 4 m/s, con una dirección preferencial hacia el noreste.



ERA	SISTEMA	SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósito Aluvial	
			Depósito Bajedal	
Cenozoico	Neógeno		Depósito Fluvioglacial	
		Mioc.	Formación Huayllay	Andesita-dacita subvol.
Mesozoico	Paleógeno	Eoc.	Formación Rumichaca	Riodacita
		Oligoc. / Paleoc.	Formación Casacalpa	
Mesozoico	Cretáceo	Inferior	Formación Chulec	
			Grupo Goyllarisquizga	Monzogranito Ranyac
Paleozoico	Jurás.	Inf.	Grupo Pucará	Tonalitas-granodioritas
			Grupo Mitu	Intrusivo Paucartambo
Paleozoico	Perm.	Sup.	Grupo Tarma	
			Grupo Ambo	
Paleozoico	Dev.	Sup.	Grupo Excelsior	
			Complejo Marañon	
		Precámbrico		

- ### Legenda
- ▲ Estación Sísmica YANA
 - Estación Meteorológica (Senamhi)
 - Pueblo
 - Vías
 - Via Principal
 - Ferrocarril
 - Drenaje
 - Rio principal
 - Laguna

Figura 6.51: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica YANA.

6.3.5.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Yanacancha se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.52, 6.53 y 6.54 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido en todas las componentes son aceptables para horas nocturnas tanto en periodos cortos como largos. La variabilidad del ruido de periodo largo, supera el límite máximo durante los intervalos de 06-12 y 12-18 horas.

Para periodos cortos (<2 s), el ruido es más bajo en la componente BHZ, aumentando ligeramente en horas del día. En las componentes BHE y BHN, también se distingue este aumento, pero son más altos que en BHZ.

Para periodos largos (<20 s), hay un prominente aumento (>20 dB) en los niveles de ruido en horas diurnas para las componentes horizontales; mientras que, BHZ se mantiene estable a lo largo del día, y con niveles muy buenos por de -150 dB.

La banda de microsismos oceánicos presenta niveles intermedios entre el límite máximo y mínimo, además, no varían a medida que transcurre el día ni tampoco de una componente a otra.

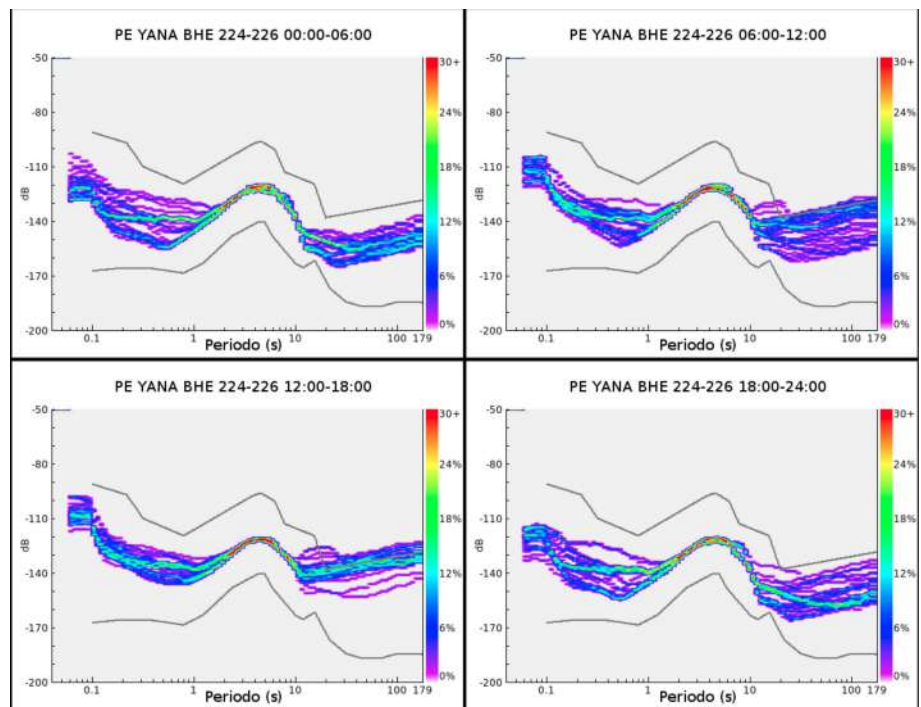


Figura 6.52: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación YANA.

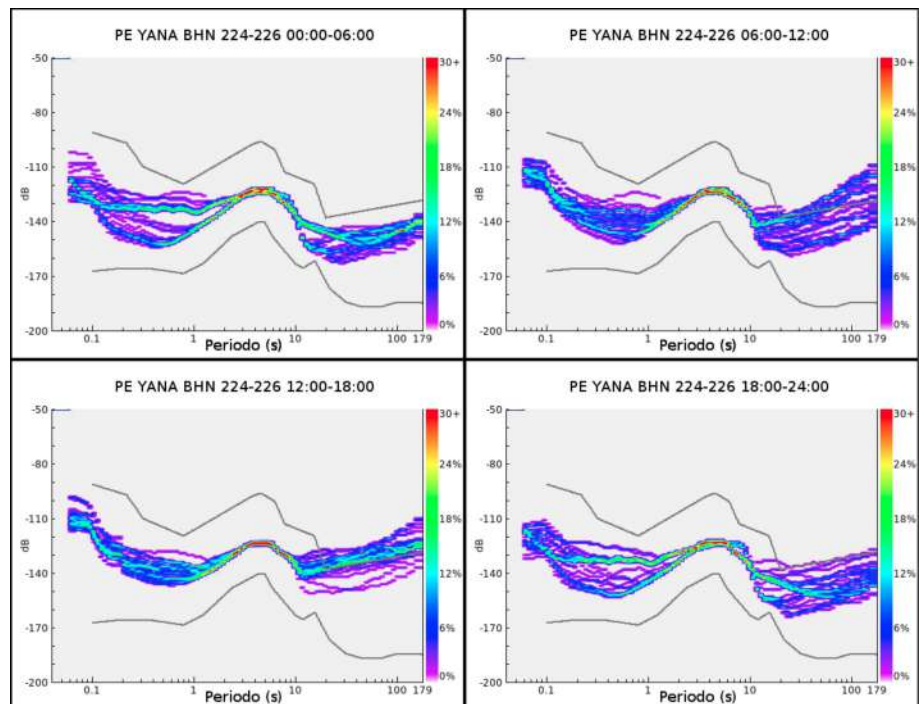


Figura 6.53: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación YANA.

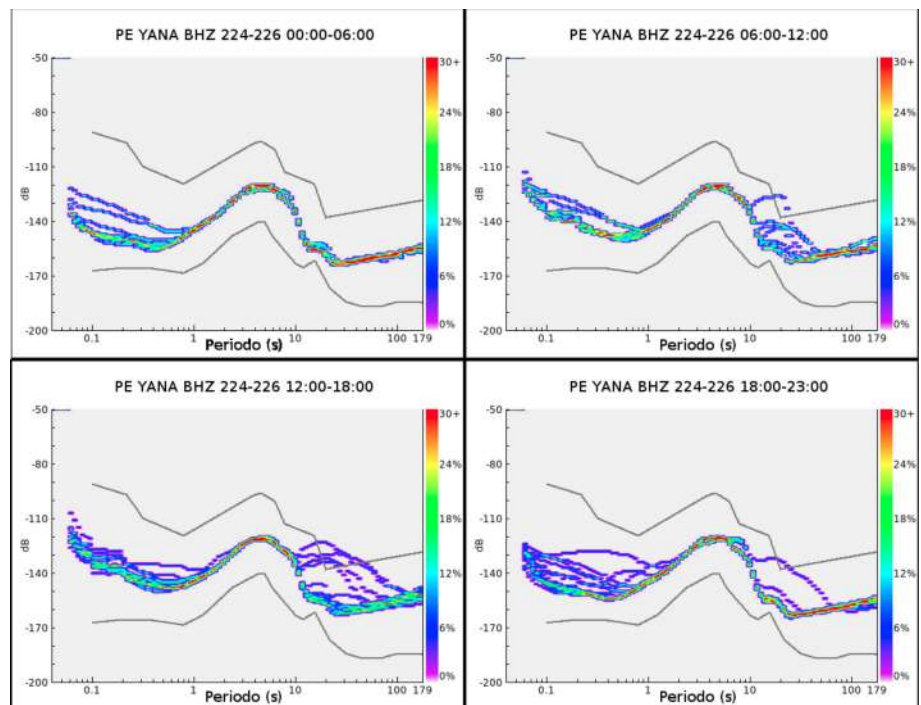


Figura 6.54: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación YANA.

6.3.5.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.55. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve que para periodos largos en las componentes horizontales el ruido es mayor y mucho más variable en el verano que en el invierno. Por otro lado, en BHZ el ruido no varía de una época a la otra, y se encuentra en niveles relativamente buenos.

Para el caso de los periodos cortos, los niveles de ruido son similares en ambas épocas del año. Además, en BHZ los niveles son menores

y menos variables.

Los microsismos oceánicos secundarios, muestran una clara variación de su pico dominante, el cual es 5-7 s en el verano y cambia a 8-9 s para el invierno. Los niveles de este tipo de ruido y el cambio estacional que presenta es igual para todas las componentes.

El pico de microsismos oceánicos primarios se distingue claramente en BHZ, para ambas épocas del año.

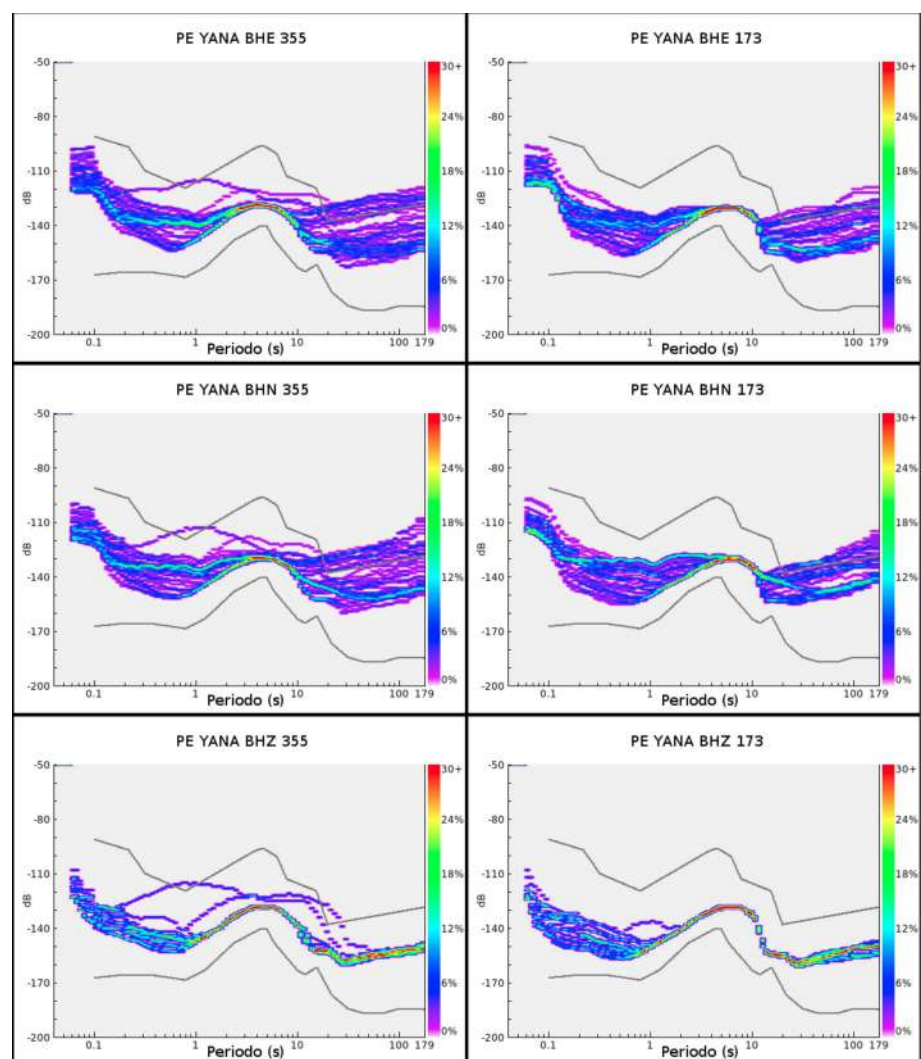


Figura 6.55: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación YANA. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.3.6 Estación Santa Isabel de Chapa (ISAB)

La estación sísmica Santa Isabel de Chapa, esta ubicada en el distrito de Aucara, provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho. Esta localizada en las coordenadas geográficas: 14.27°S, 74.01°O, y a una altitud de 3798 m.s.n.m.; además, se encuentra a 178 km de la línea de costa.

Demográficamente, la provincia de Lucanas, tiene un bajo número de habitantes, siendo su índice de densidad poblacional de 4.7 *habitantes/km²*. El distrito de Aucara, que envuelve a los centros poblados Santa Isabel de Chapa, San Diego de Ishua y Cacralla cuenta con una población de 5,433 *habitantes*.

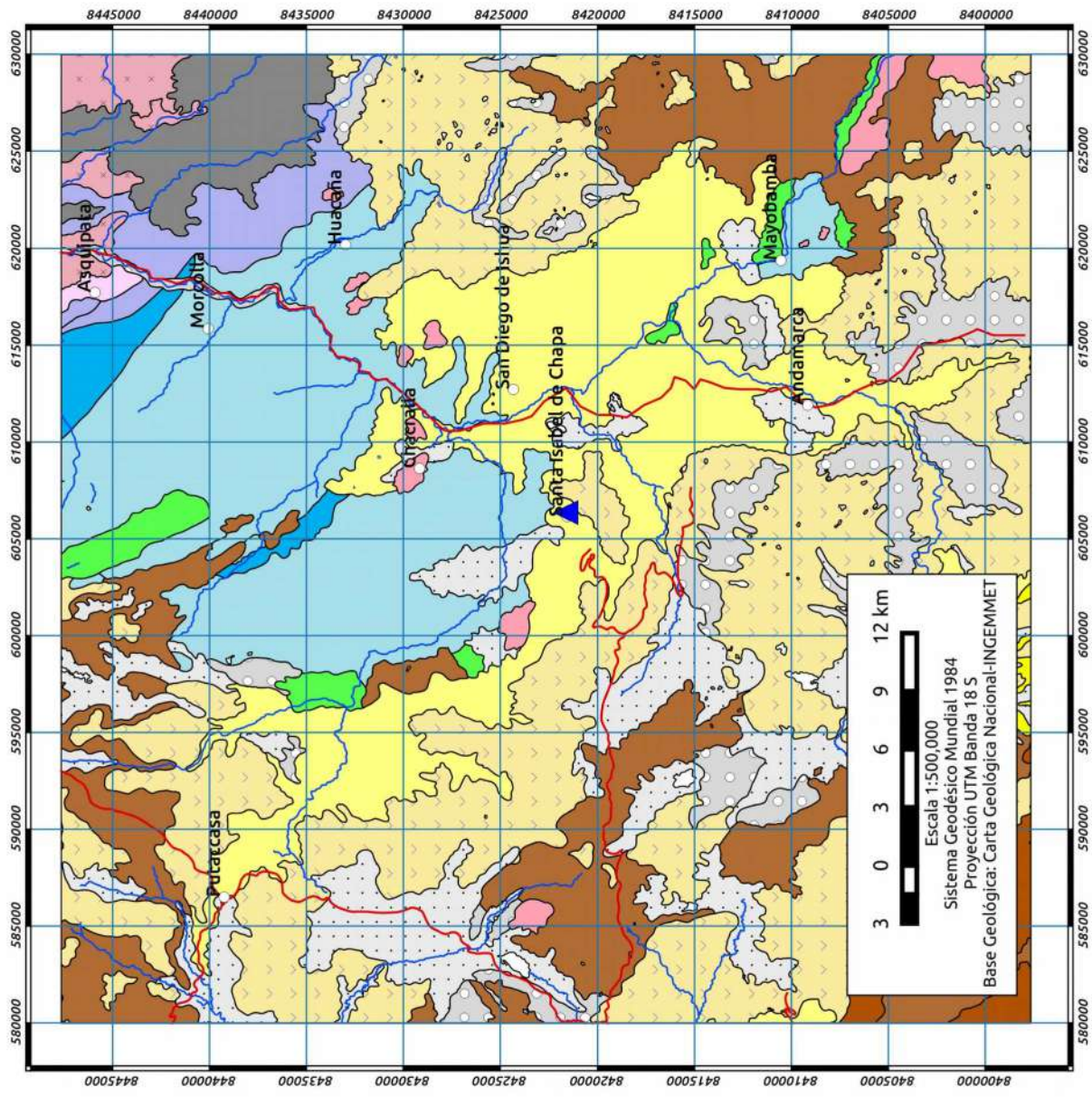
6.3.6.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.56 presenta la geología local de la estación Santa Isabel de Chapa, la misma que se encuentra instalada sobre rocas de la Formación Andamarca. Litológicamente, es una secuencia volcánico-clástica, compuesta por niveles de conglomerados clasto-soportados, niveles de limoarcillas e ignimbritas (Brandmeier, 2014). Su potencia se estima en el rango de los 300 m. Esta formación es datada al Plioceno.

6.3.6.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo Clima Lluvioso Semi-frío. En general, es frío y húmedo. Además, lluvioso, con precipitaciones anuales de 700 mm.

Las temperaturas máximas y mínimas van desde los 22 hasta los 5°C para el verano, y de los 20 hasta 1°C para el invierno. La velocidad de los vientos es por lo general de 2 *m/s*, subiendo hasta 6 *m/s* ocasionalmente.



ERA	SISTEMA	SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos Cuaternarios Recientes	Dacita	
		Pleistoceno	Depósitos Fluvio-glaciares		
	Neogeno	Plioceno	Formación Yacotínco		
		Mioceno	Grupo Barroso		
Mesozoico	Paleogeno	Cretaceo	Formación Andamarca	Dacita	
			Sup. Inf.		Formación Caudalosa
	Jurásico	Sup. Inf.	Grupo Tacaza	Dacita	
		Sup. Sup.	Formación Puquío		
	Paleozoico	Triásico	Sup. Inf.	Formación Arcuquina	Complejo Querobamba
			Sup. Sup.	Grupo Yura	
		Permiano	Sup. Inf.	Formación Sacosani	
			Sup. Sup.	Grupo Pucará	
				Grupo Mitu	

Legenda

- ▲ Estación Sísmica ISAB
- Pueblo
- Drenaje
- Río secundario
- Vías
- Vía Secundaria

Figura 6.56: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica ISAB.

6.3.6.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Santa Isabel de Chapa se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.57, 6.58 y 6.59 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico están por debajo del límite máximo, excepto para los periodos largos en las componentes horizontales, donde el ruido supera los límites máximos entre las horas 12:00-18:00.

Para la banda de periodos cortos (<2 s), el ruido claramente muestra una variación diurna, incrementando durante las horas del día hasta en 20 dB en todas las componentes.

Para la banda de periodos largos (>20 s), el ruido en las componentes horizontales aumenta considerablemente a lo largo del día y decrece para la noche. Este aumento llega a superar el límite máximo entre las horas 12:00-18:00. Por otro lado la componente BHZ muestra relativamente buenos niveles de ruido, los mismos que se mantienen constantes a lo largo del día.

La banda de microsismos oceánicos presenta niveles intermedios entre los límites máximo y mínimo, además, no muestra una variación diurna, ni de componente a componente.

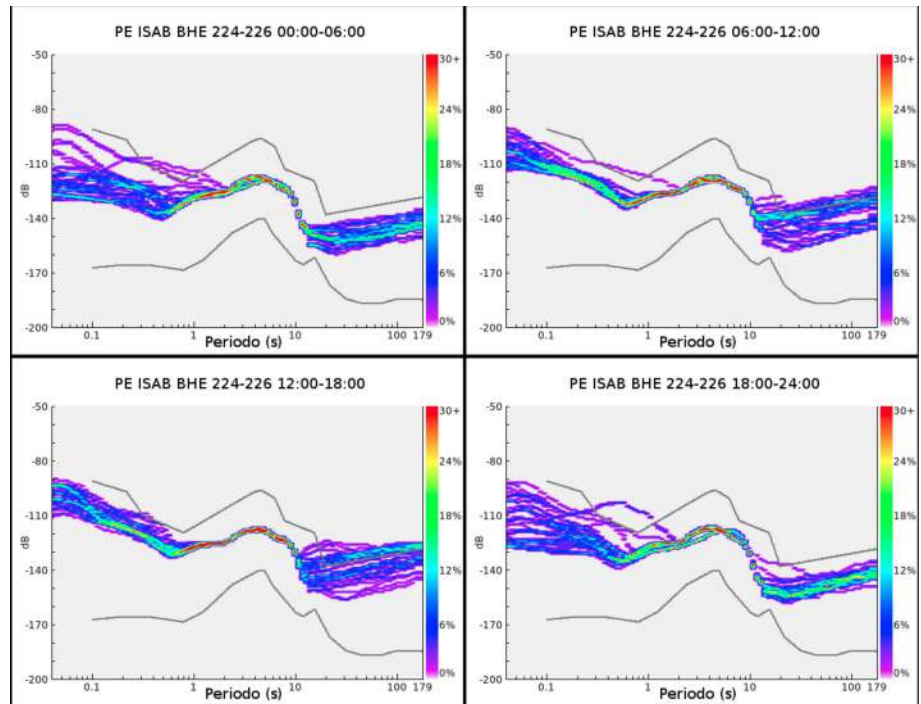


Figura 6.57: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación ISAB.

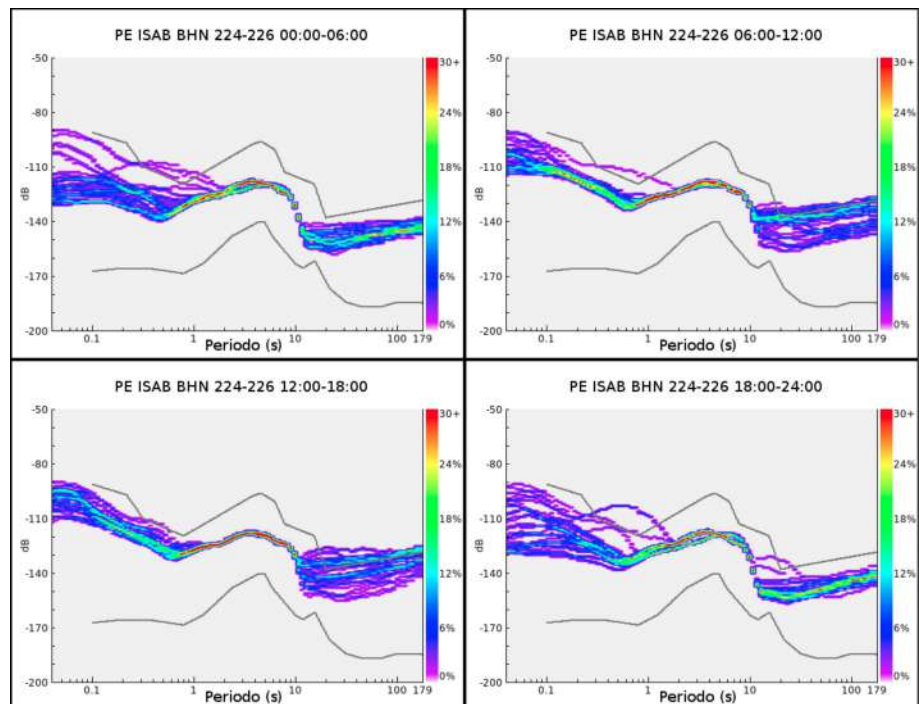


Figura 6.58: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación ISAB.

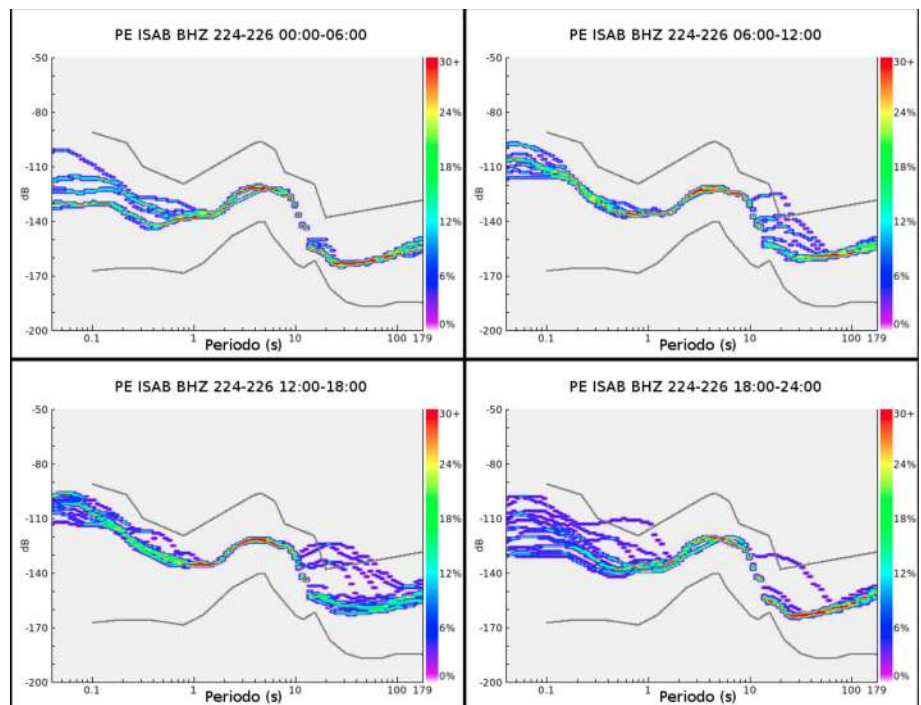


Figura 6.59: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación ISAB.

6.3.6.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.60. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En general, se ve que los niveles de ruido sísmico de las componentes horizontales son muy variables en la banda de periodos largos y cortos tanto en el verano como en el invierno.

Los microsismos oceánicos secundarios mantienen su potencia espectral en el verano y el invierno, sin embargo, el periodo dominante se alarga pasando de 5-6 s a 8-9 s. Este cambio esta presente y tiene las mismas

características en todas las componentes.

Adicionalmente, los niveles de ruido de la componente BHZ son inferiores y mucho menos variables a aquellos de BHE y BHN en la banda de periodo corto y sobretodo, en la de periodos largos.

El pico de microsismos oceánicos primarios solo es distinguible en BHZ en ambas épocas del año, siendo más agudo en el verano.

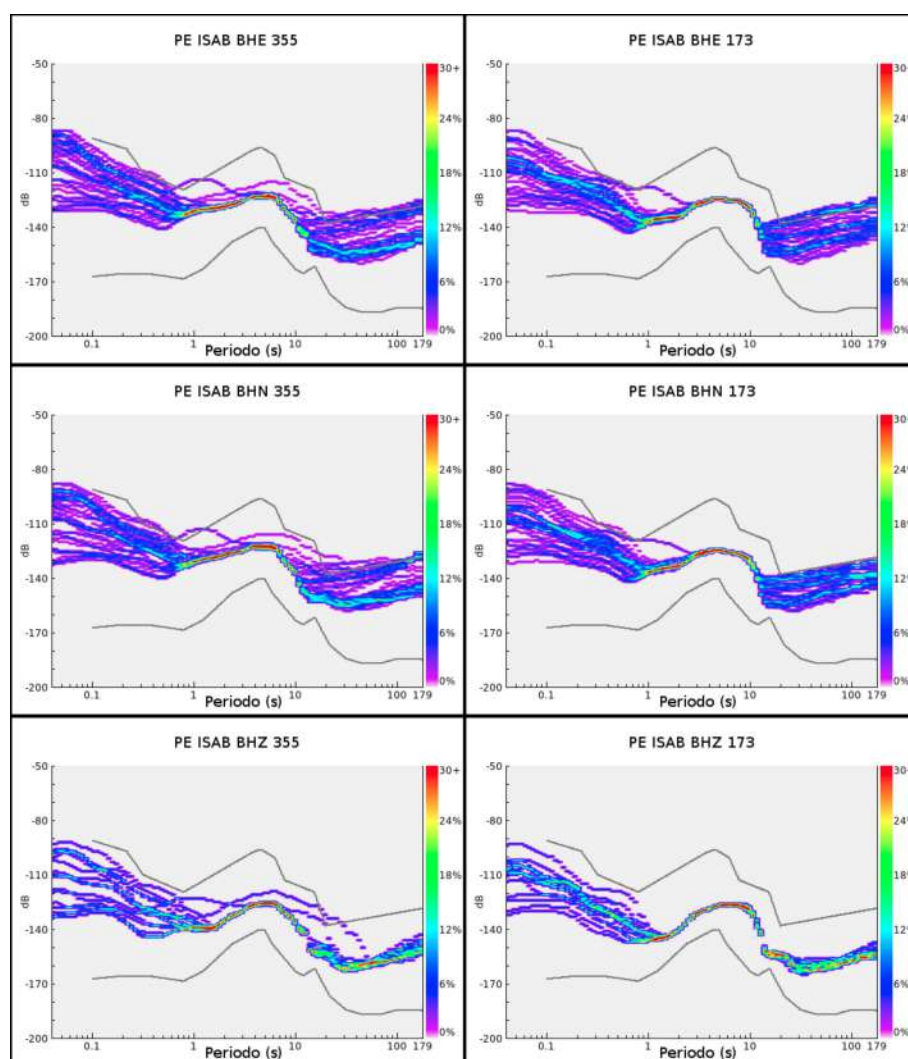


Figura 6.60: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación ISAB. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.3.7 Estación Chivay (CHVY)

La estación sísmica Chivay, esta ubicada en el distrito del mismo nombre, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa. Esta localizada en las coordenadas geográficas: 15.55°S, 71.55°O y a una altitud de 3768 m.s.n.m.; además, esta a 159 km de la línea de costa.

Demográficamente, la provincia de Caylloma presenta una densidad poblacional de 6.7 *habitantes/km²*. El centro poblado de Tuti es el más cercano, ubicado a 2.5 km al NNE de la estación, cuenta con 758 *habitantes*. Le sigue Chivay, con 7,688 *habitantes*, a 10 km al SO.

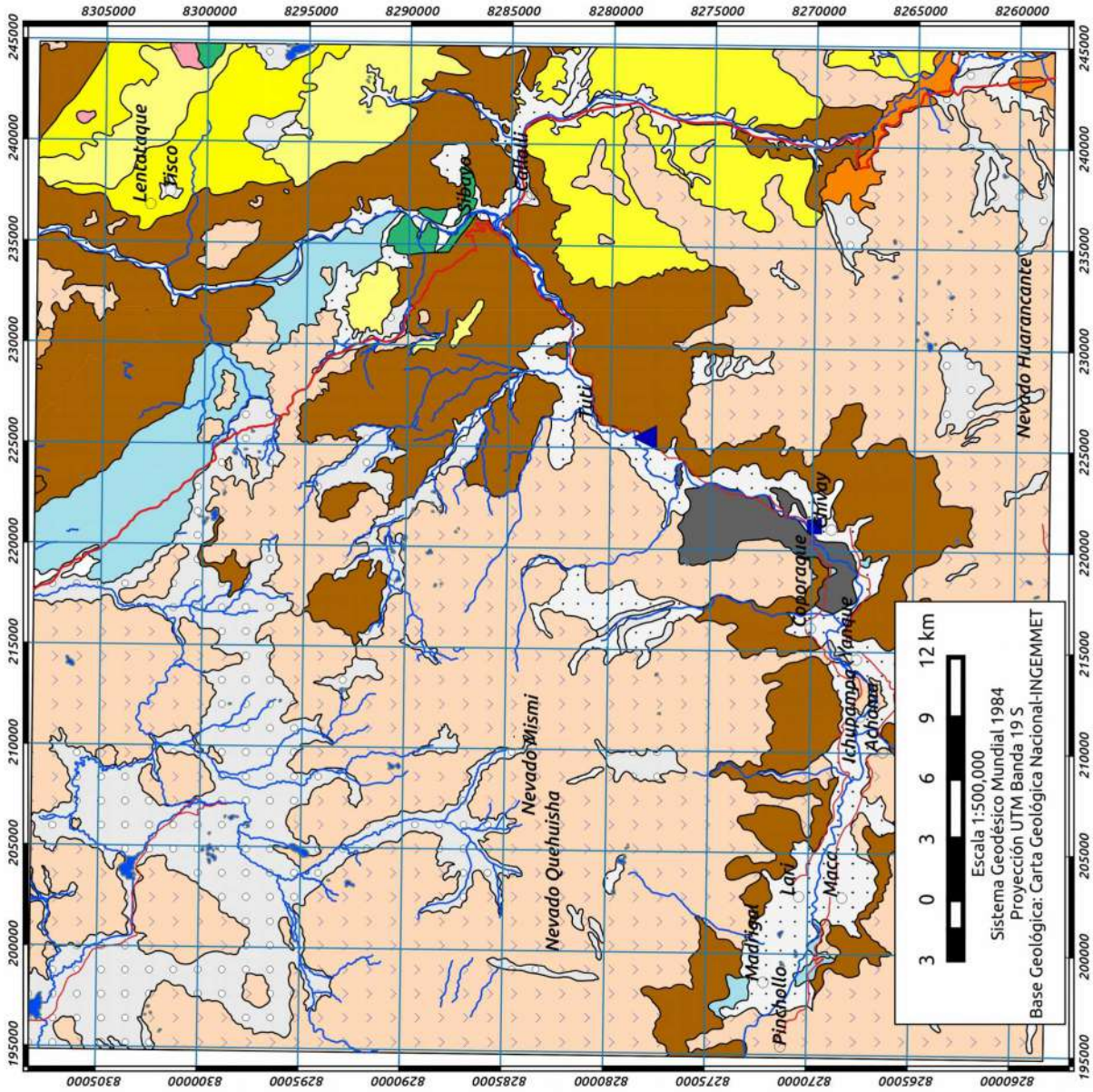
6.3.7.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.61 presenta la geología local de la estación Chivay, la misma que se encuentra instalada sobre rocas del Grupo Tacaza. Litológicamente, representa una secuencia volcánico sedimentaria de gran extensión. del miembro A de la Formación Orcopampa, el cual esta constituido por areniscas, brechas y lavas de composición andesítica (Dávila, 1988). Su datación geocronológica corresponde al Oligoceno.

6.3.7.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo Frío o Boreal (De los Valles Mesoandinos). En general, es frío y seco, con precipitaciones anuales promedio de 700 mm.

La estación meteorológica Chivay, ubicada a 10 km al SSO de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van desde los 23 hasta los 4°C para el verano, y de los 20 hasta -2°C para el invierno. Las velocidades de los vientos oscilan entre 4 y 6 *m/s*.



ERA	SISTEMASERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Unidad Cataupaicho	
		Pleistoceno		
	Neogeno	Plioceno		
		Mioceno		
		Oligo. Eoc.		
		Cretaceo		Sup. Inf.
	Sup. Med.			
	Mesozoico			

Unidad Litoestratigráfica	Color
Depósitos Cuaternarios	[White]
Depósitos Fluvio-glaciares	[Light Grey]
Grupo Andagua	[Dark Grey]
Grupo Barroso	[Light Orange]
Formación Capillune	[Orange]
Formación Confital	[Dark Orange]
Grupo Sillapaca	[Yellow]
Formación Palca	[Light Yellow]
Grupo Maure	[Yellow-Green]
Grupo Tacaza	[Brown]
Formación Arcurquina	[Green]
Grupo Yura	[Light Blue]

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica CHVY
- Estación Meteorológica (Senamhi)
- Pueblo
- Drenaje
- Laguna
- Vias
- Via Principal
- Via Secundaria

Figura 6.61: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica CHVY.

6.3.7.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Chivay se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.62, 6.63 y 6.64 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido son aceptables durante la noche para las componentes horizontales, sin embargo, en ciertas horas diurnas se eleva hasta superar el límite máximo, tanto para periodos largos como para la banda de 0.3 a 0.7 s. El ruido en BHZ es menor, y no llega a superar en ninguna instancia el límite máximo.

Para periodos cortos (<2 s), hay un evidente aumento en los niveles de ruido en todas las componentes (~10 dB), este aumento se da en las horas del día, sobre todo entre las 12:00-18:00. Para las componentes horizontales, este aumento llega a superar los niveles máximo en la banda 0.3-0.7 s.

Para periodos largos (>20 s), el ruido en BHZ es estable durante todo el día. Para las componentes horizontales va aumentando a medida que transcurren las horas diurnas, llegando a su máximo entre las 12:00-18:00, momento en el cual el ruido llega a superar en 10 dB al límite máximo.

Los microsismos oceánicos son estables a lo largo del día y tampoco muestran una variación por componente.

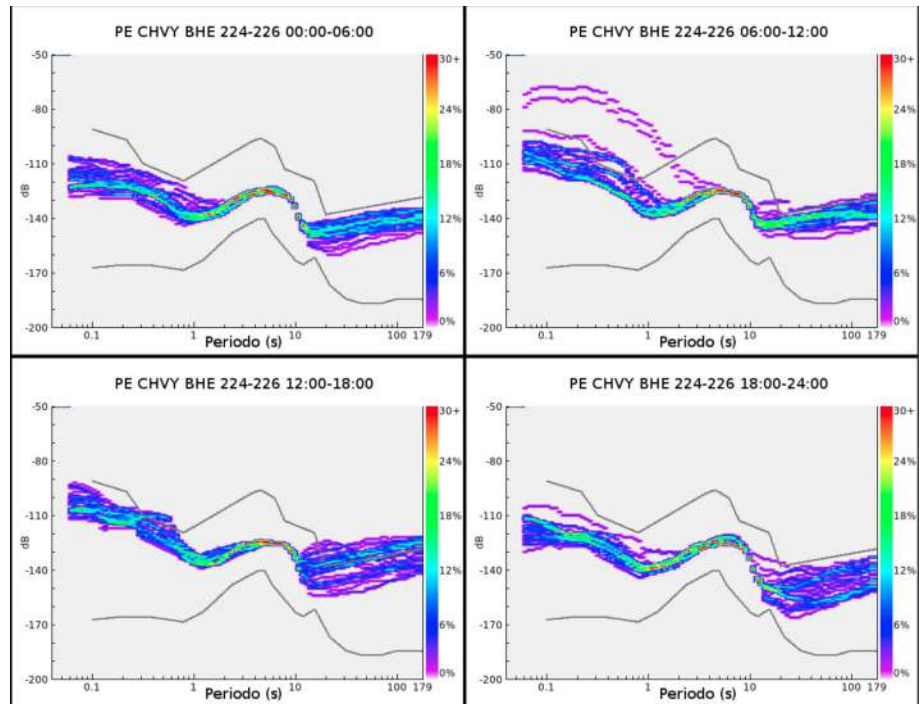


Figura 6.62: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación CHVY.

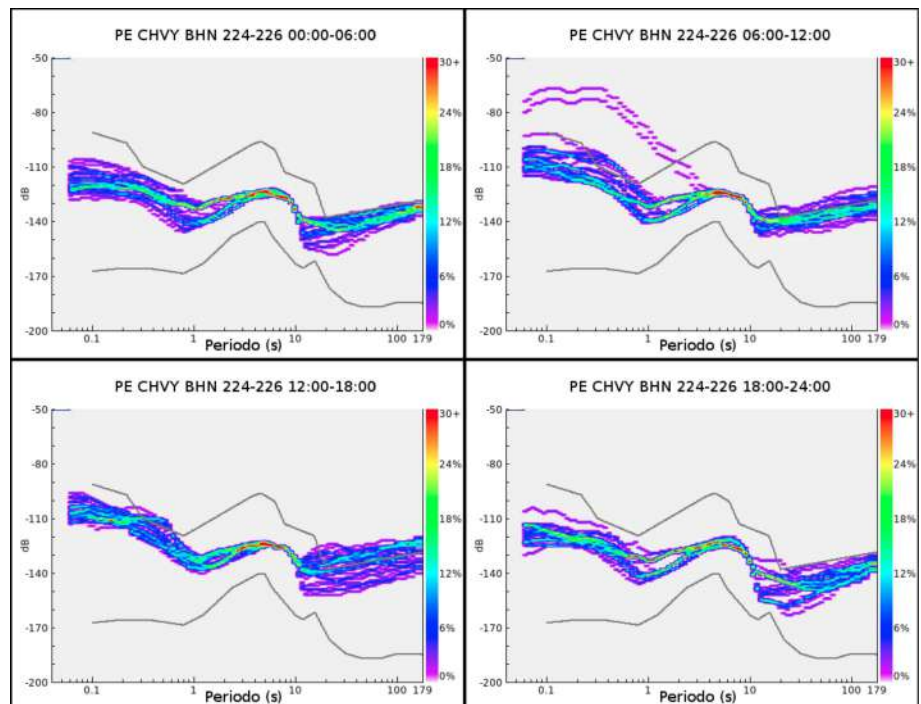


Figura 6.63: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación CHVY.

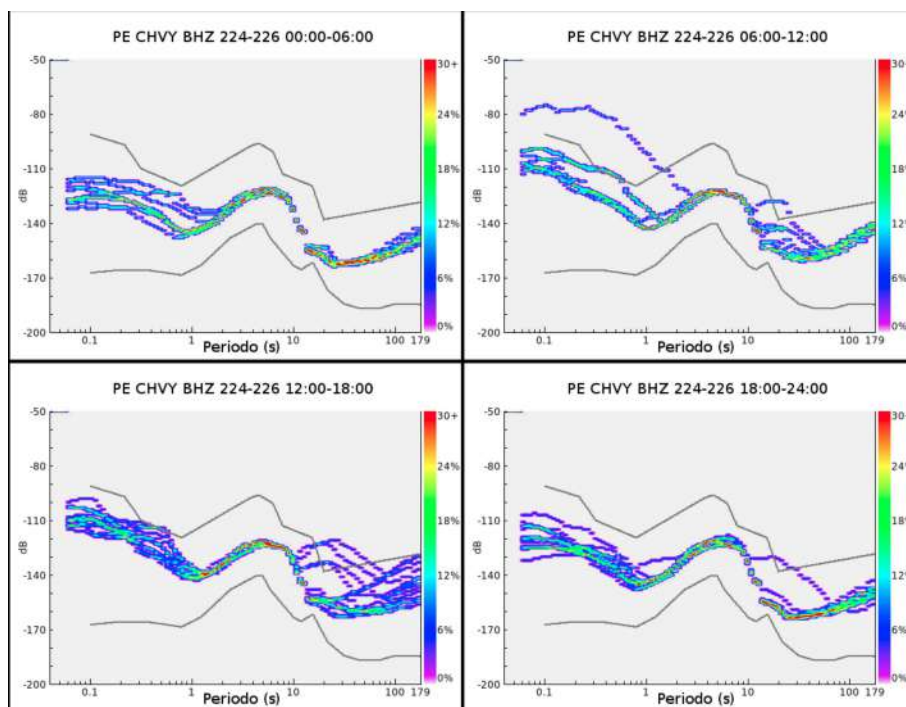


Figura 6.64: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación CHVY.

6.3.7.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.65. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

Los niveles de ruido para periodos largos y cortos son ligeramente inferiores durante el invierno. Por otro lado, en ambas épocas del año la variabilidad de estos niveles de ruido es grande.

Para los microsismos oceánicos secundarios, se observa una ligera reducción en los niveles de ruido al pasar del verano al invierno, y a su vez, hay un cambio del pico dominante (7-8 s),

el cual se desplaza hacia periodos más largos.

El pico de microsismos primarios es indistinguible en todas las componentes dada la gran variabilidad de ruido sísmico de periodo largo.

Adicionalmente, la componente BHZ presenta los niveles más bajos entre las tres componentes, y varía mínimamente sus características entre verano e invierno.

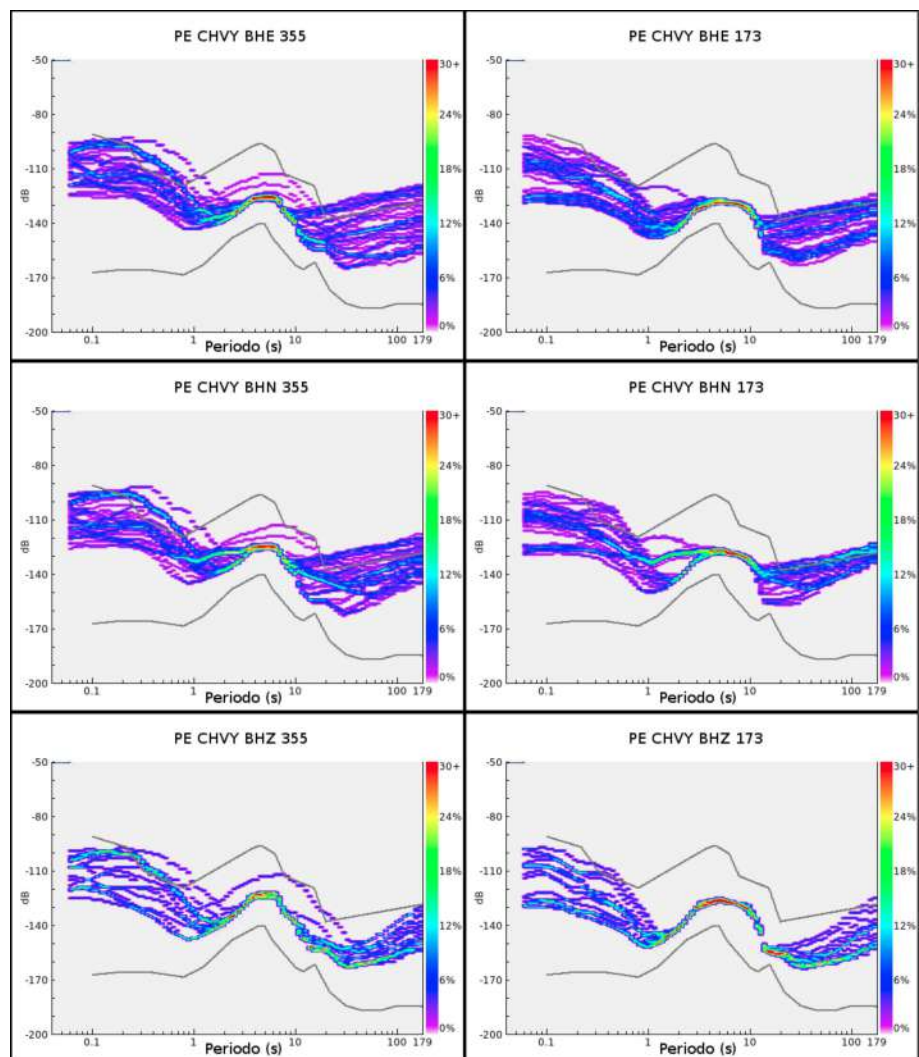


Figura 6.65: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación CHVY. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.3.8 Estación Alto Perú (ALTO)

La estación sísmica Alto Perú, esta ubicada en el distrito de Palca, provincia y departamento de Tacna. Esta localizada en las coordenadas geográficas: 17.57°S, 69.68°O, y a una altitud de 4338 m.s.n.m.; además, esta a 120 km de la línea de costa.

Demográficamente, la provincia de Palca presenta una densidad poblacional de 38.4 *habitantes/km²*. El distrito de Palca, tiene un población de 1,659 *habitantes*, los cuales están distribuidos en los centros poblados de Alto Peru, Curipiña y Chachacomani

6.3.8.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.66 presenta la geología local de la estación Alto Perú, la cual se encuentra instalada sobre Depósitos Cuaternarios del tipo fluvioglaciario, compuestos por gravas y arenas en matriz limoarenosa, así como por arenas y materiales residuales no consolidados (Mendivil, 1965). Estos depósitos se encuentran cubriendo a las Andesitas Porfiríticas del Grupo Barroso.

6.3.8.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un Clima Frío o Boreal (De los Valles Mesoandinos). En general, es frío y seco, con precipitaciones anuales promedio de 700 mm.

De acuerdo a la información de la estación Meteorológica Chuapalca, ubicada a 32 km al NNE, la temperatura máxima y mínima varía de 20 a -10°C en el verano y de 16 a -15°C en el invierno. Los vientos muestran velocidades de 4 hasta 8 m/s sin una dirección preferencial aparente.

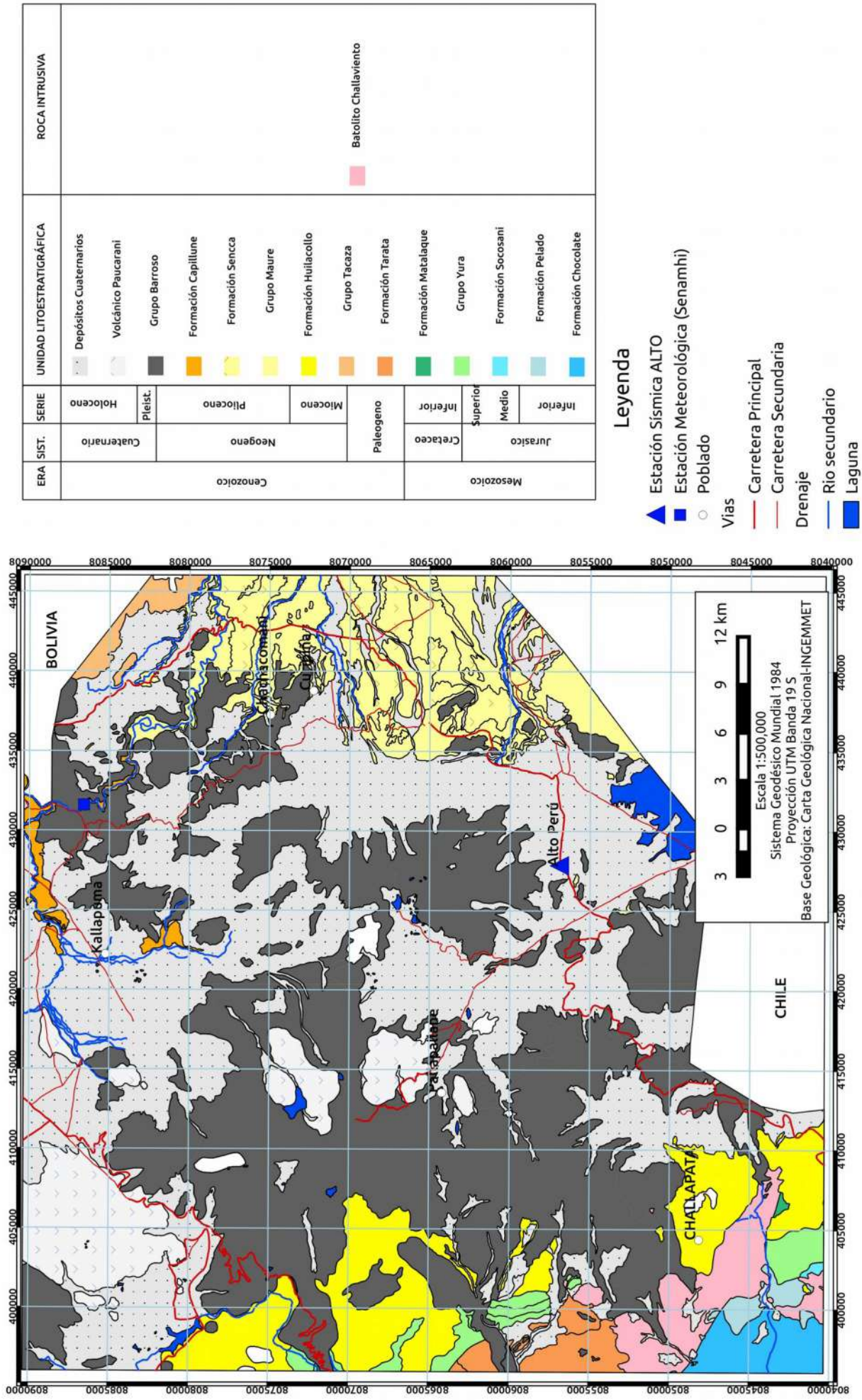


Figura 6.66: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica ALTO.

6.3.8.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Alto Perú se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.67, 6.68 y 6.69 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico son aceptables en todas las componentes para periodos cortos y microsismos. Por otro lado, en BHE y BHN el ruido es muy alto la mayor parte del día. Esto sería indicador que la estación podría estar viéndose afectada por las variables ambientales de presión y temperatura (ver Murphy y Savino, 1975).

Para periodos cortos (<2 s), se nota un aumento de más de 10 dB en todas las componentes durante los periodos diurnos, este aumento es mucho más notorio en BHZ.

Para periodos largos (>20 s), el ruido presenta niveles aceptables a lo largo del día en la componente BHZ. Por el contrario, BHE y BHN superan el límite máximo la mayor parte del tiempo, salvo en el periodo de 18:00-24:00.

Los microsismos oceánicos muestran un comportamiento estable durante todo el día, además es idéntico en las tres componentes.

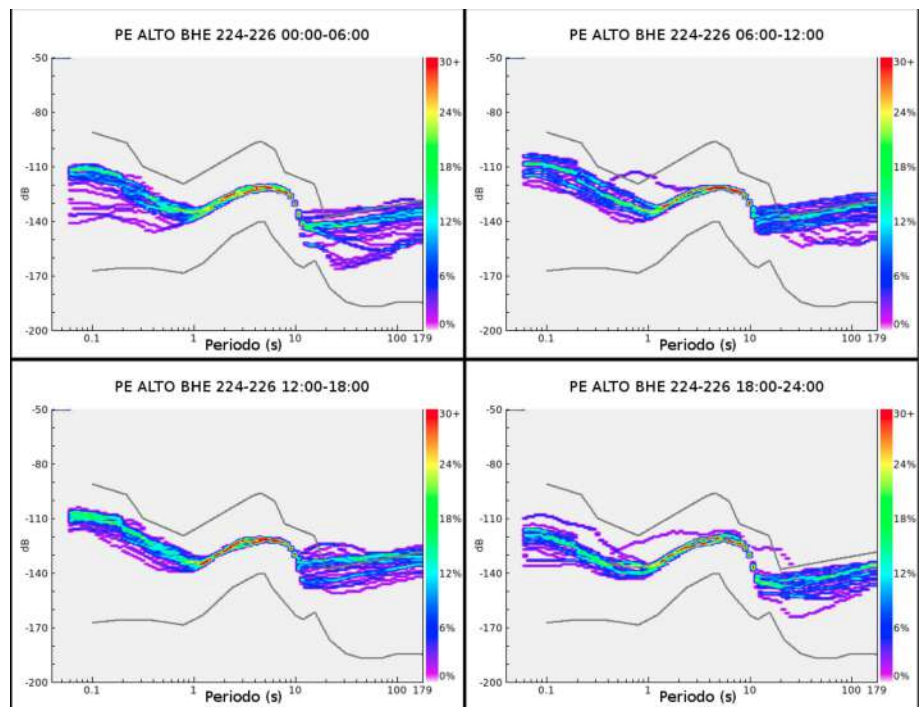


Figura 6.67: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación ALTO.

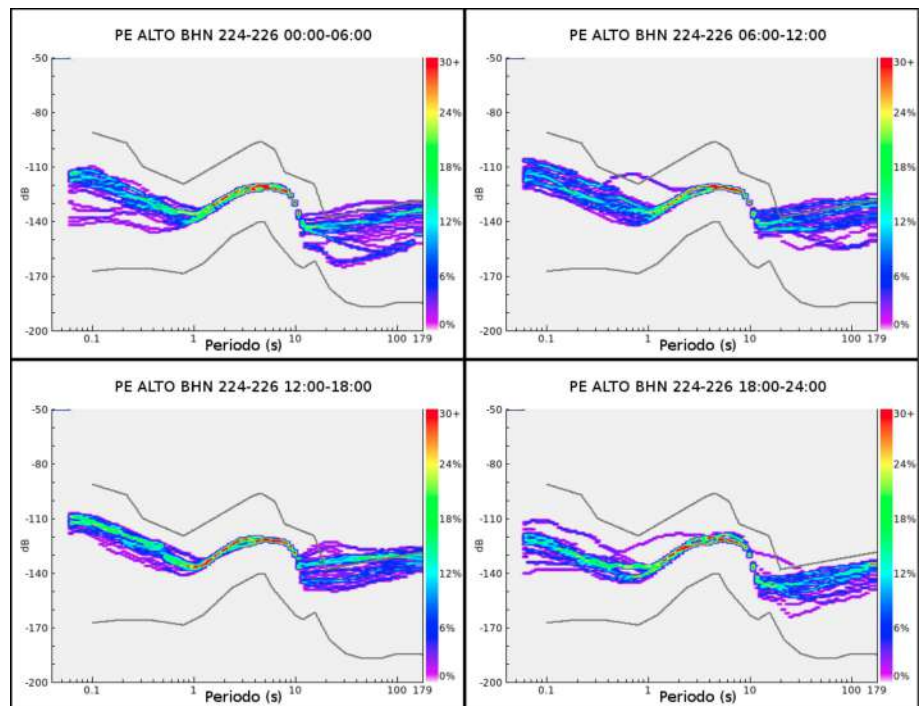


Figura 6.68: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación ALTO.

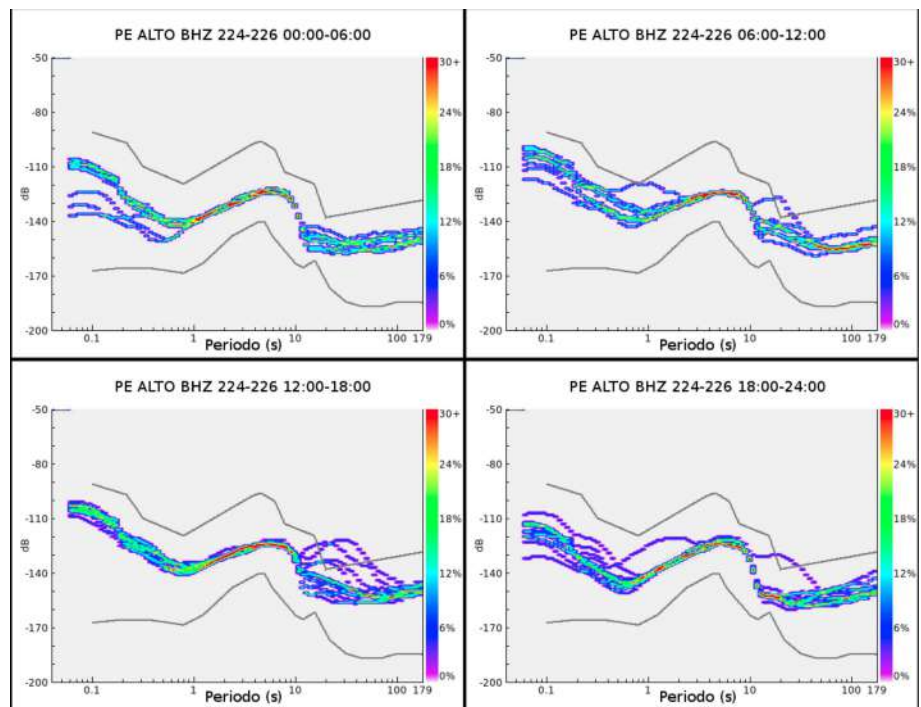


Figura 6.69: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación ALTO.

6.3.8.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.70. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

Para periodos cortos, no se nota en ninguna de las componente un cambio significativo entre el verano y el invierno.

Para periodos largos, se ve claramente que durante el verano el ruido tiene niveles bajos y estables; mientras que en el invierno, los niveles aumentan considerablemente, la gran variabilidad hace que el límite máximo sea superado has por un margen de 10 dB en todas

las componentes.

Para los microsismos oceánicos secundarios, el ruido sísmico aumenta significativamente en toda esta banda durante el invierno. Este cambio también incluye un cambio en el periodo dominante, el cual cambia su pico dominante de 3-5 s hacia uno más largo de 2.5-8 s.

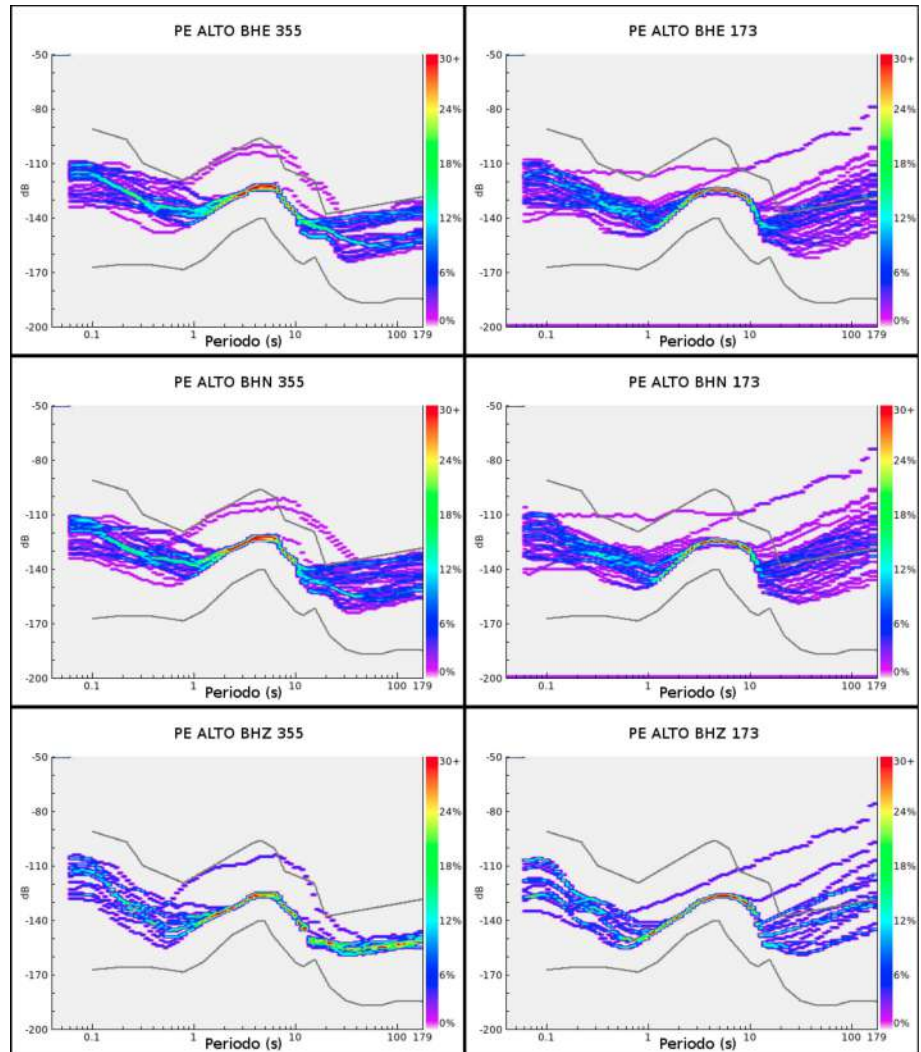


Figura 6.70: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación ALTO. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.3.9 Estación Ayrampuni (AYRA)

La estación sísmica Ayrampuni, esta ubicada en el distrito de Pedro Vilca Apaza, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno. Se ubica en las coordenadas geográficas: 15.05°S, 69.88°O, y a una altitud de 3853 m.s.n.m.; además, se encuentra a 300 km de la línea de costa y a 30 km del Lago Titicaca.

Demográficamente, la provincia de San Antonio de Putina tiene una densidad poblacional de 21.9 habitantes/km². Huancane, es la ciudad populosa más cercana, cuenta con aproximadamente 19,000 habitantes y esta a 20 km al SE de la estación.

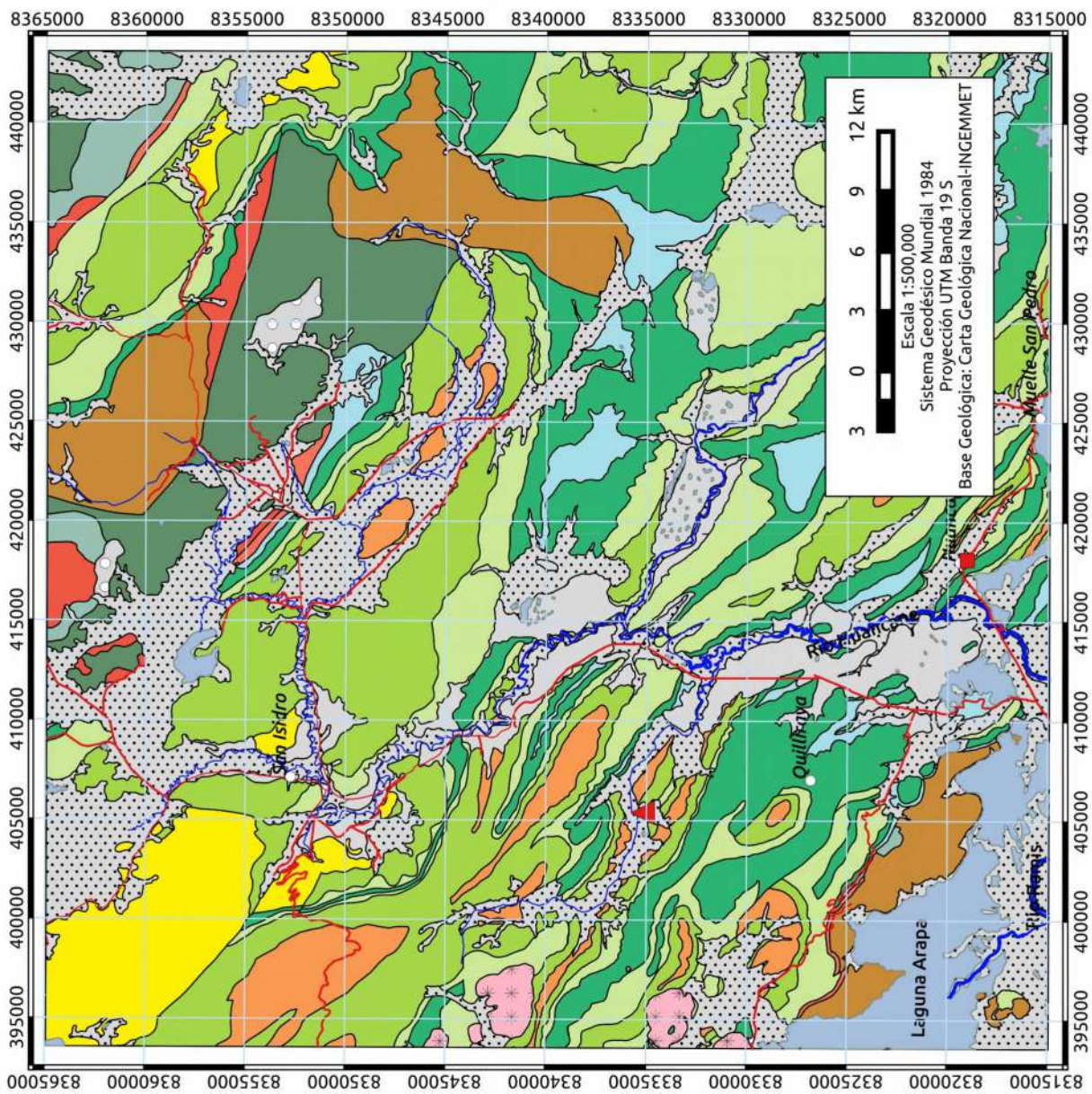
6.3.9.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.71 presenta la geología local de la estación Ayrampuni, la cual se encuentra instalada sobre Depósitos Cuaternarios Aluviales compuestos por gravas y arenas mal ordenadas en una matriz arenolimosas. Estos depósitos son de poco espesor, y se encuentran sobreyaciendo la formación Vilquechico, esta última esta compuesta por areniscas finas, lutitas, calizas y dolomitas (Chavez et al., 1996). Se le calcula un espesor de aproximadamente 550 m, y es datada al Cretáceo Superior.

6.3.9.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona se encuentra ubicada en un Clima Frío o Boreal (De los Valles Mesoandinos). En general, es frío y seco, con precipitaciones anuales promedio de 700 mm.

La estación meteorológica Huancane, ubicada a 21 km al SE de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van de 19 hasta 1°C para el verano y de 16 hasta -6°C para el invierno. La dirección predominante de los vientos es para el sureste, con velocidades que promedian los 6m/s, aunque suelen llegar en ocasiones hasta los 11m/s.



Era	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva	
Cenozoico	Cuaternario	Koleceno	Depósitos Cuaternarios	Calaca	
			Depósitos Morrenicos		
			Formación Azangaro		
	Neogeno	Eoceno	Formación Muñani		
			Formación Auzangate		
	Mesozoico	Cretáceo	Faleoceno		Formación Vilquechico
			Superior		Grupo Moño
					Inferior
			Jurásico		Superior
		Inferior			Grupo Mitu
Paleozoico		Permiano	Superior	Grupo Copacabana	
			Inferior	Grupo Tarma	
		Carbonífero	Superior	Grupo Ambo	
			Inferior	Formación Chagrapí	
Devoniano					
Siluriano					

Legenda

- ▲ Estación Sísmica AYRA
- Estación Meteorológica (Senamhi)
- Lugar
- Vías
 - Carretera Principal
 - Carretera Secundaria
- Drenaje
 - Río
 - Laguna

Figura 6.71: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica AYRA.

6.3.9.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Ayrampuni se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.72, 6.73 y 6.74 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido son muy variables, llegando a superar los niveles máximos durante horas del día tanto en periodos cortos como largos. Esto podría deberse al depósito cuaternario sobre el cual ha sido instalada la estación.

Para periodos cortos (<2 s) aumentan drásticamente hasta 30 dB para los periodos diurnos en las componentes horizontales. Además, este cambio es incluso más notorio para BHZ.

Una característica peculiar resalta entre los periodos 1-2 s, ella es más notoria en las componentes BHN y BHE, siendo constante durante las 24 horas del día. Estos niveles de ruido pueden deberse al efecto del lago Titicaca, el cual generaría este tipo de ruido de la misma manera que el océano (ver Fiedrich et al., 1998).

Para periodos largos (>20 s) el ruido varía en más de 30 dB en las componentes horizontales, llegando a superar el límite máximo por ~ 20 dB. En BHZ, los niveles de ruido sísmico son adecuados y se mantienen constante a lo largo del día.

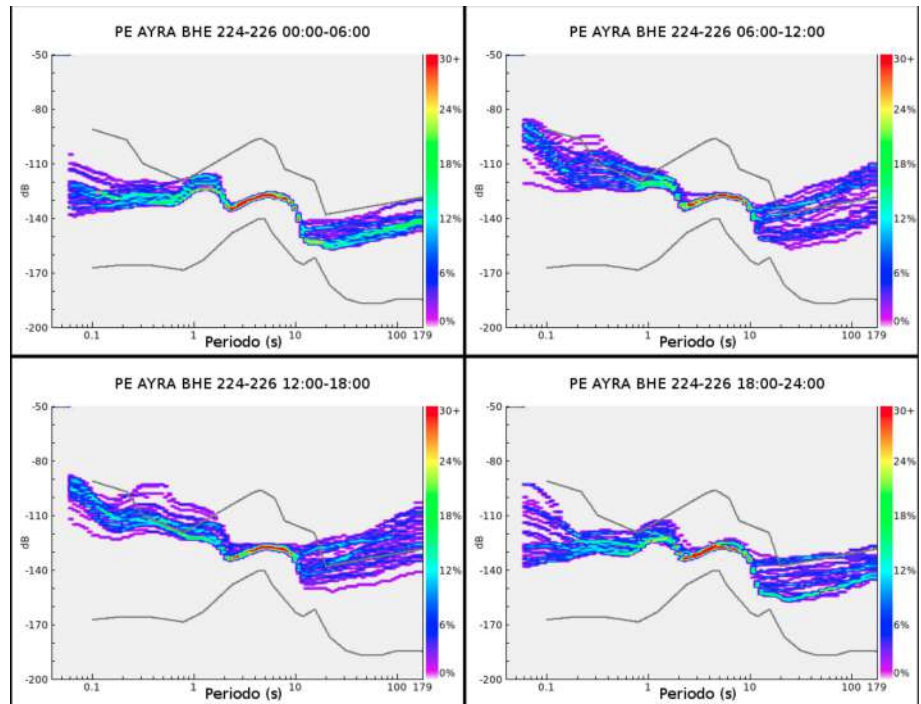


Figura 6.72: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación AYRA.

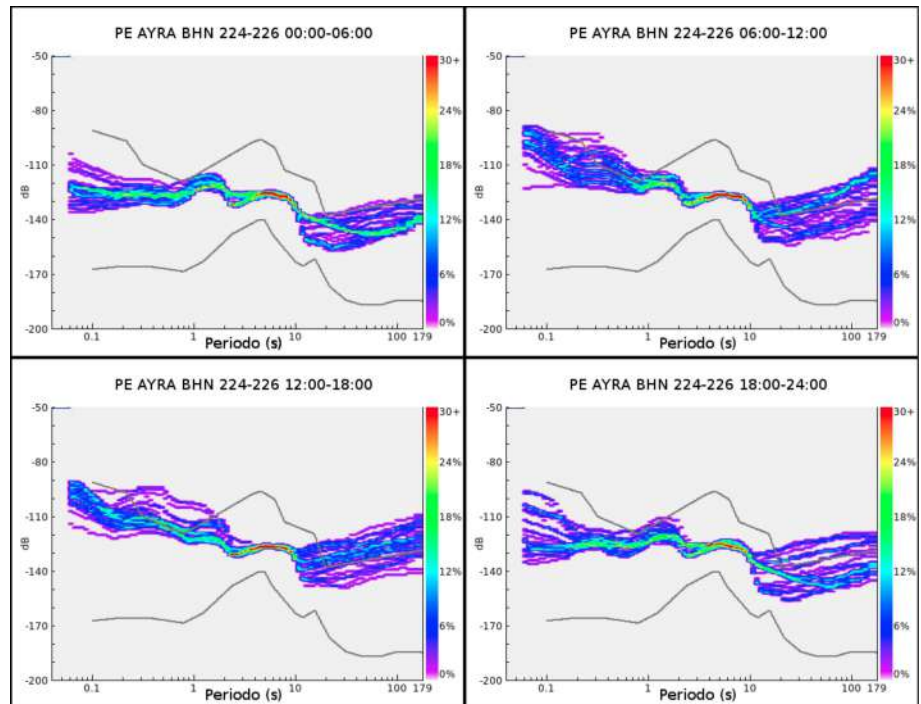


Figura 6.73: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación AYRA.

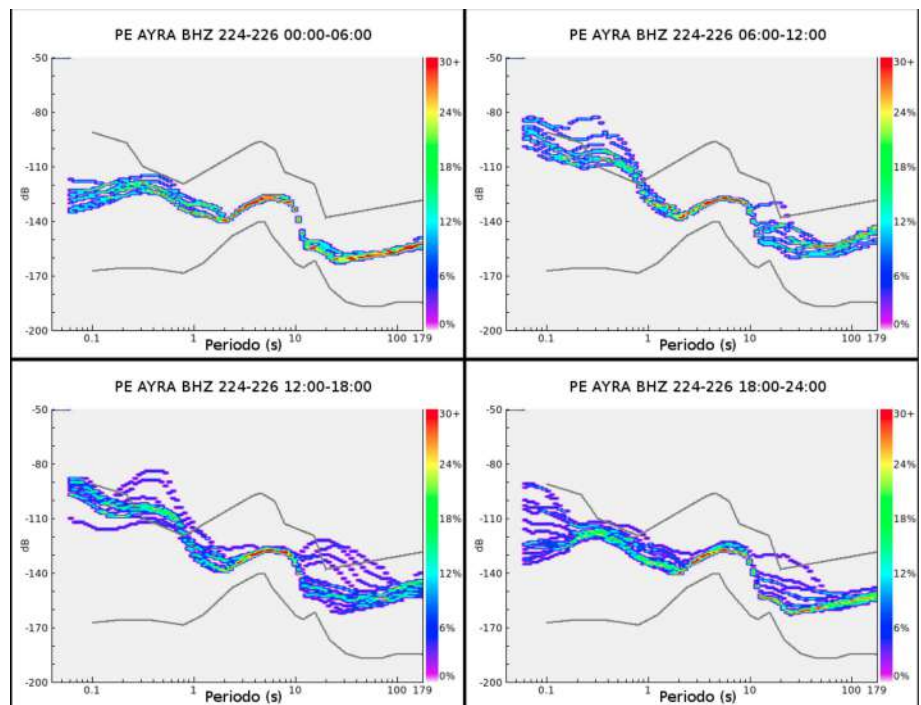


Figura 6.74: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación AYRA.

6.3.9.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.4. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

Para los periodos largos, en las componentes horizontales los niveles de ruido son ligeramente menores en el invierno, pero la alta variabilidad se mantiene. Para BHZ, no se detecta cambio alguno.

Para periodos cortos, no hay variación significativa entre una época del año y otra.

Los microsismos oceánicos secundarios, cambia

su periodo dominante en todas las componentes, haciéndose más largo para el invierno. Este cambio se muestra en todas las componentes con las mismas características e intensidad.

Adicionalmente, el ruido anómalo entre los periodos 1-2 s del cual se hablo en la sección anterior persiste tanto en el verano e invierno. A su vez, este ruido es ligeramente mayor durante el verano.

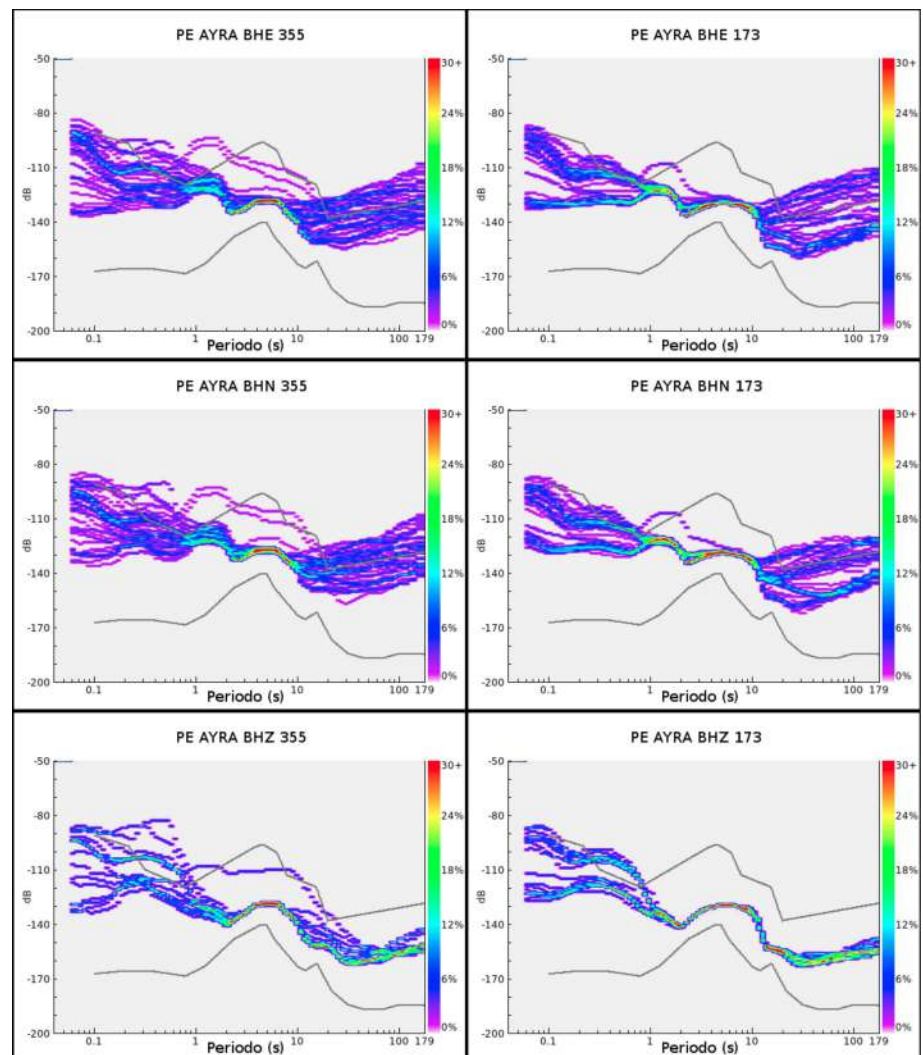


Figura 6.75: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación AYRA. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.3.10 Estación Cusco (CUS)

La estación sísmica Cusco se encuentra ubicada en el distrito de Cusco, provincia y departamento de Cusco. Se ubica en las coordenadas geográficas: 6.00°S , 79.68°O , y a una altitud de 3863 m.s.n.m.; además, se encuentra a una distancia de 350 km de la línea de la costa.

Demográficamente, se encuentra a 5 km al Norte de la ciudad de Cusco, la cual tiene una población muy grande (427,000 habitantes). Además, la provincia de Cusco presenta una densidad poblacional de $849.2 \text{ habitantes/km}^2$, lo que la hace la segunda provincia con más densidad de habitantes del Perú.

6.3.10.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.76 presenta la geología local de la estación Cusco, la misma que se encuentra sobre rocas del Grupo San Jerónimo, más precisamente, sobre la Formación Kayra, la cual esta constituida esencialmente por areniscas feldespáticas (Carlotto et al, 1996) del Eoceno Medio-Oligoceno Inferior.

6.3.10.2 Clima

Según la clasificación de Thorthwaite, la zona donde se encuentra instalada la estación presenta un clima de tipo Frío o Boreal (de Valles Mesoandinos).

Presentan precipitaciones anuales promedio de 700 mm. Y sus temperaturas medias anuales son de 12°C . Los veranos son lluviosos y los inviernos secos con fuertes heladas.

Según la información de la estación Meteorológica Granja Kcayra, ubicada a 13 km al SE de la estación sísmica, la temperatura máximas suelen superar los 22°C tanto en el invierno como en el verano. Mientras que las mínimas bajan hasta -2°C para el invierno y hasta 5°C en el verano. Los vientos son muy variables, presentan velocidades de 4 hasta 12 m/s y direcciones erráticas.

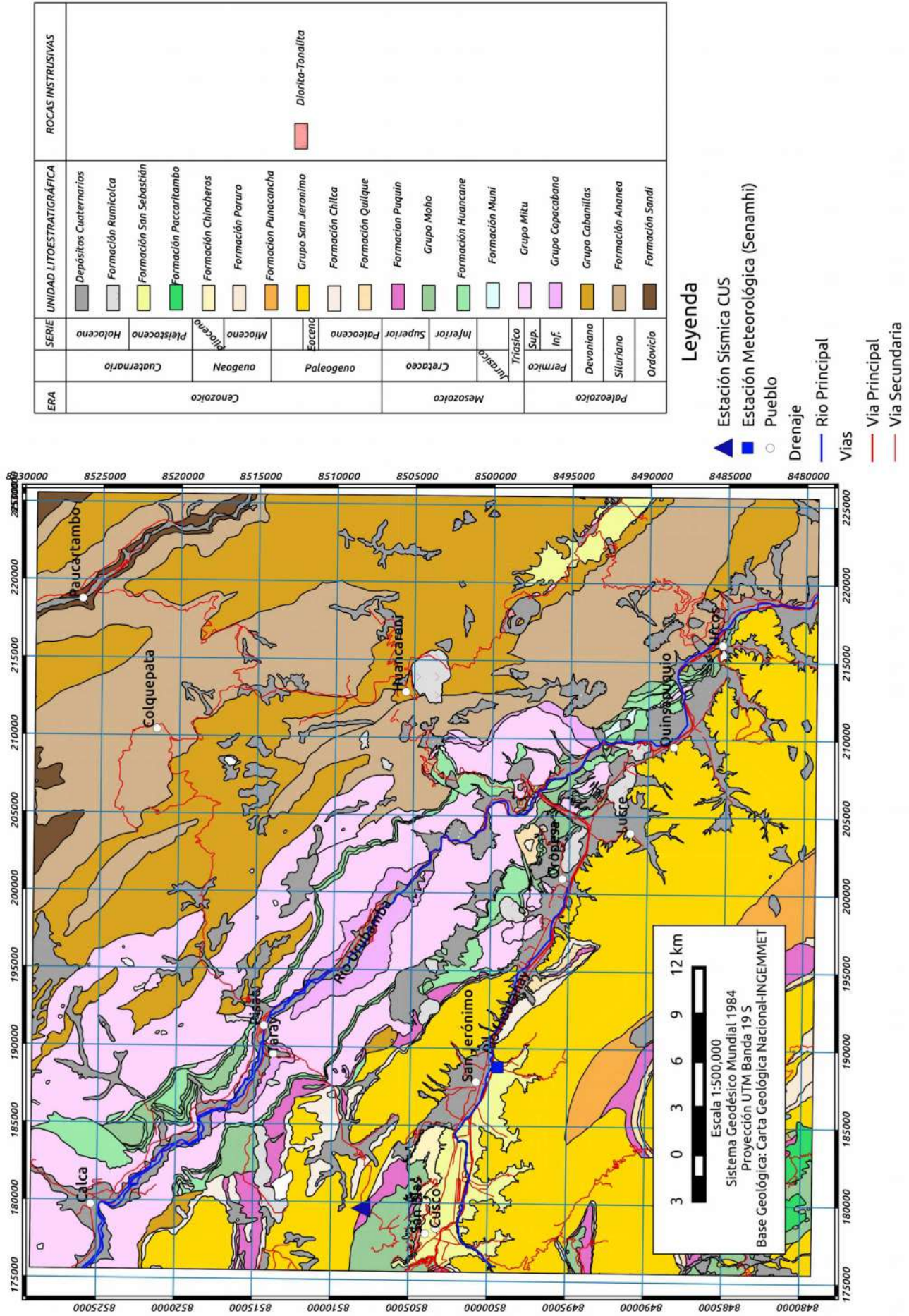


Figura 6.76: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica CUS.

6.3.10.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Cusco se tomaron los registros de 5 días de semana (10-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.77, 6.78 y 6.79 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles del ruido se encuentran muy cercanos al límite mínimo, por lo tanto, la información es de muy buena calidad, tanto para periodos bajos y altos. Esta estación es la que presenta los niveles de ruido sísmico más bajos de la REDSSAT-IGP.

Para periodos cortos (<2 s), se ve que para todas las componentes el ruido aumenta hasta en 20 dB para las 06:00-18:00 con respecto a las 00:00, y para el periodo de 18:00-24:00, muestra mayor variabilidad, lo que indica un descenso del ruido a medida que se acercan las horas de la noche.

Para los periodos largos, no se nota alguna variación diurna, tampoco se aprecia la predominancia de este ruido en las componentes horizontales sobre la vertical, lo que indica una correcta instalación de sensor.

La banda de microsismos oceánicos es persistente a lo largo del día, y no cambia de una componente a otra.

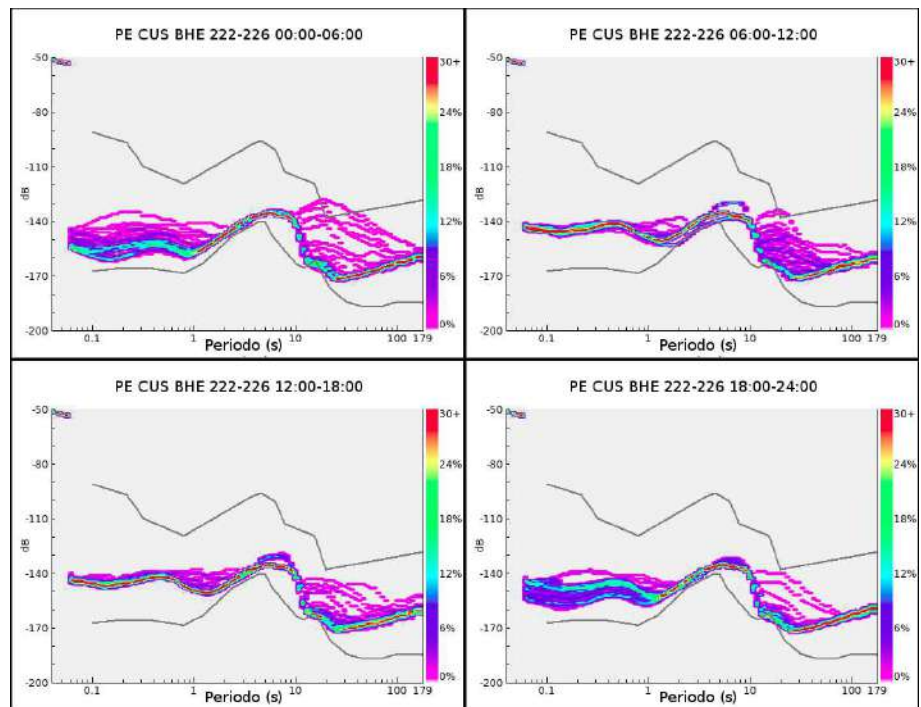


Figura 6.77: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación CUS.

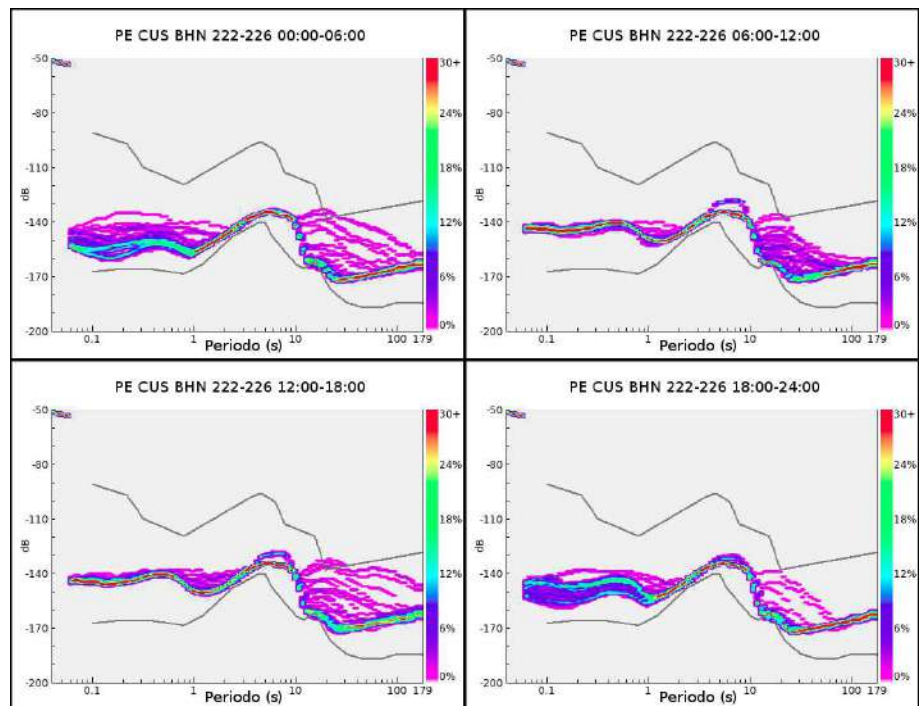


Figura 6.78: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación CUS.

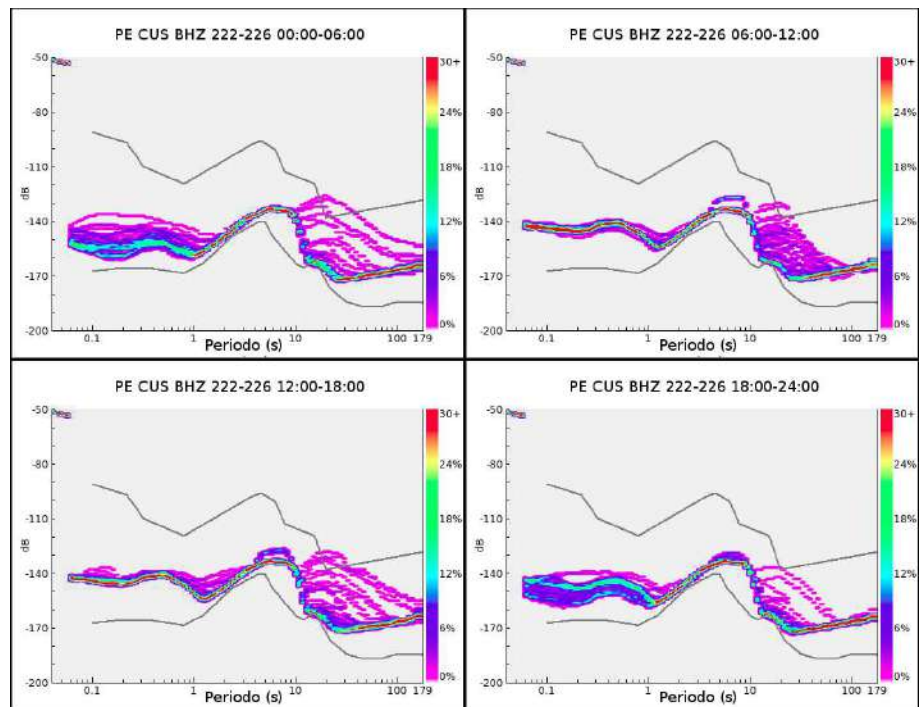


Figura 6.79: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación CUS.

6.3.10.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.80. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

Para periodos largos, se ve un pequeño aumento de menos de 5 dB para las componentes horizontales, lo cual indica que la estación se encuentra correctamente aislada de los cambios climáticos.

Para periodos cortos, no se distingue cambio alguno de una época a otra en ninguna de las componentes.

Para los microsismos oceánicos, se resalta la variación en la banda de microsismos primarios, los cuales son notorios durante el verano, pero reducen su intensidad durante el invierno. Por otro lado los microsismos secundarios cambian su periodo dominante pasando de 5 s en el verano hacia 7-9 s en el invierno. Estas cambio de las características frecuenciales esta presente y es igual en todas las componentes.

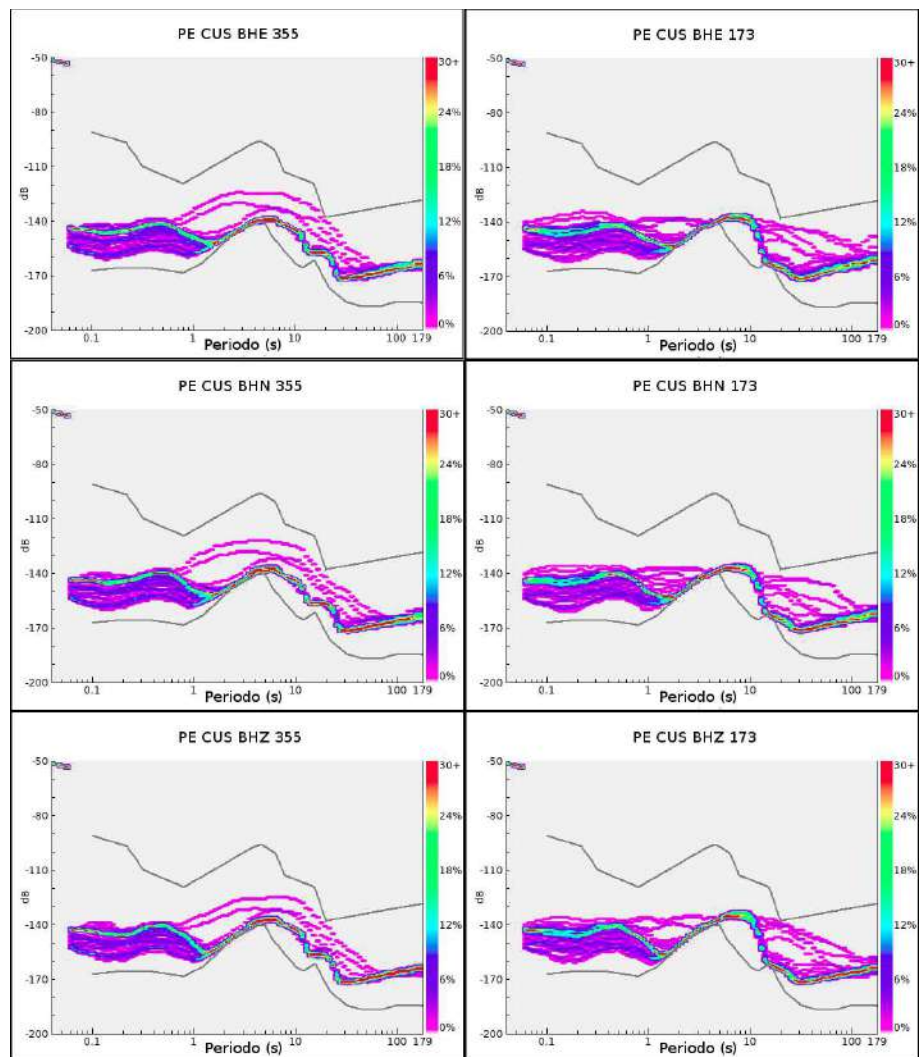


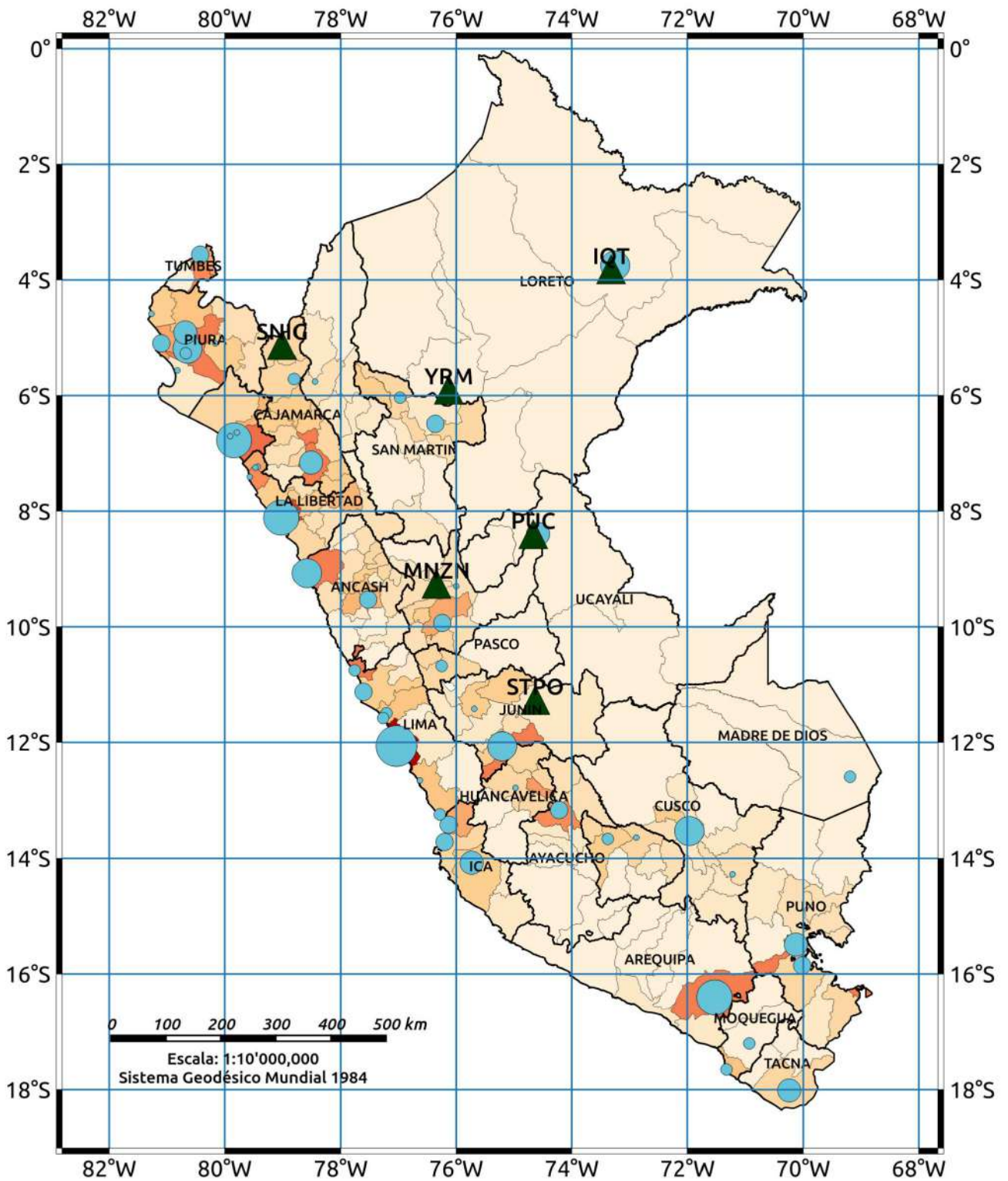
Figura 6.80: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación CUS. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.4 Estaciones Sísmicas de Tras-arco

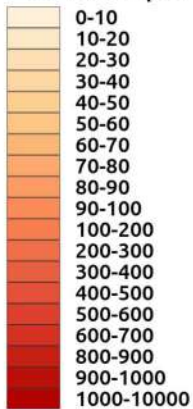
Bajo esta clasificación se encuentran las estaciones ubicadas en la selva alta y baja. La distancia con respecto a la línea de costa varía de 210 hasta 800 km. En la Tabla 6.3, se presentan sus coordenadas geográficas, elevaciones y distancias con respecto a la línea de costa. El Mapa de la Figura 6.81 muestra la distribución espacial de estas estaciones, junto con las ciudades más pobladas del país y el índice de densidad poblacional por provincias.

Tabla 6.3: Estaciones de Tras-arco

NOMBRE	COD	LAT (°)	LON (°)	ELEV (msnm)	DIST COSTA(km)
San Ignacio	SNIG	-5.12	-79.01	1782	210
Monzón	MNZN	-9.25	-76.34	871	225
Satipo	STPO	-11.26	-74.63	152	270
Yurimaguas	YRM	-5.89	-76.13	146	420
Pucallpa	PUC	-8.39	-74.66	152	435
Iquitos	IQT	-3.82	-73.32	113	800



Personas por km²



Estación Sísmica

Ciudades mas pobladas

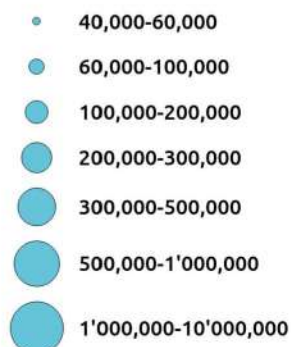


Figura 6.81: Distribución Espacial de Estaciones Sísmicas de Tras-arco de la REDSSAT.

6.4.1 Estación San Ignacio (SNIG)

La estación sísmica San Ignacio se encuentra ubicada en el distrito y provincia de San Ignacio, departamento de Cajamarca. Se ubica en las coordenadas geográficas: 5.12°S, 79.01°O, a una altitud de 1782 m.s.n.m. y a 210 km de la línea de costa.

Demográficamente, la provincia de San Ignacio tiene una densidad poblacional de 30.1 *habitantes/km²*. Además, a 2.5 km al SE de la estación se encuentra la ciudad de San Ignacio, la cual cuenta con una población de 36,472 *habitantes*.

6.4.1.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.82 presenta la geología local de la estación San Ignacio, la cual se encuentra instalada sobre la Formación Oyotún. Esta formación es una secuencia de rocas volcánicas con algunas intercalaciones sedimentarias. La litología está representada principalmente por lavas andesíticas afaníticas (De La Cruz, 1995). Se le estima una edad Jurásica y una potencia variable de alrededor de 2000 m.

6.4.1.2 Clima

Según la clasificación de Thorthwaite, la zona presenta un clima de tipo Cálido Semi-seco, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, y con humedad relativa calificada como húmeda.

La estación meteorológica de San Ignacio, ubicada a 3 km al SE de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van de 25 a 17°C para el invierno y de 29 a 17°C para el verano. La velocidad predominante de los vientos es de 2 *m/s*, y ocasionalmente llega a subir hasta los 6 *m/s*, con direcciones predominantes sureste.



ERA	SISTEMA	SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósito Aluvial		
			Depósito Coluvial		
	Neog.	Pleist.	Formación Tamboraque		
		Plioc.	Formación Nabelle		
Mesozoico	Paleog.	Mioc.	Grupo Quilichian	Diorita	
			Grupo Pulluicana	Granodiorita	
			Formación Chulec	Granito	
	Cretaceo	Superior	Grupo Coyllarisquizaga		
		Inferior	Formación Oyotún		
	Jurásico		Grupo Salas		
			Complejo de Olmos		
	Paleog.	Ordovícico		Complejo de Marañón	
			Precámbrico		

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica SNIG
- Estación Meteorológica (Senamhi)
- Pueblo
- Via Principal
- Drenaje
- Río Principal

Figura 6.82: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica SNIG.

6.4.1.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación San Ignacio se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.83, 6.84 y 6.85 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido sísmico en todas las componentes se encuentran dentro de los límites máximos, sin embargo, para horas diurnas en periodos cortos de todas las componentes, y para periodos largos en las componentes horizontales los niveles son próximos a este límite.

Para la banda de periodos cortos (<2 s), el ruido sísmico muestra claramente un aumento diurno de 10 dB en todas las componentes. Por otro lado, el ruido en BHZ es relativamente menor (5 dB) con respecto a BHE y BHN.

Para la banda de periodos largos (>20 s), en las componentes horizontales se nota una variación de ~15 dB para los periodos diurnos. A su vez, la componente BHZ no muestra esta variación, y los valores son menores a las componentes horizontales durante todo el día.

La banda de microsismos oceánicos es constante a lo largo de todo el día, y de una componente a otra.

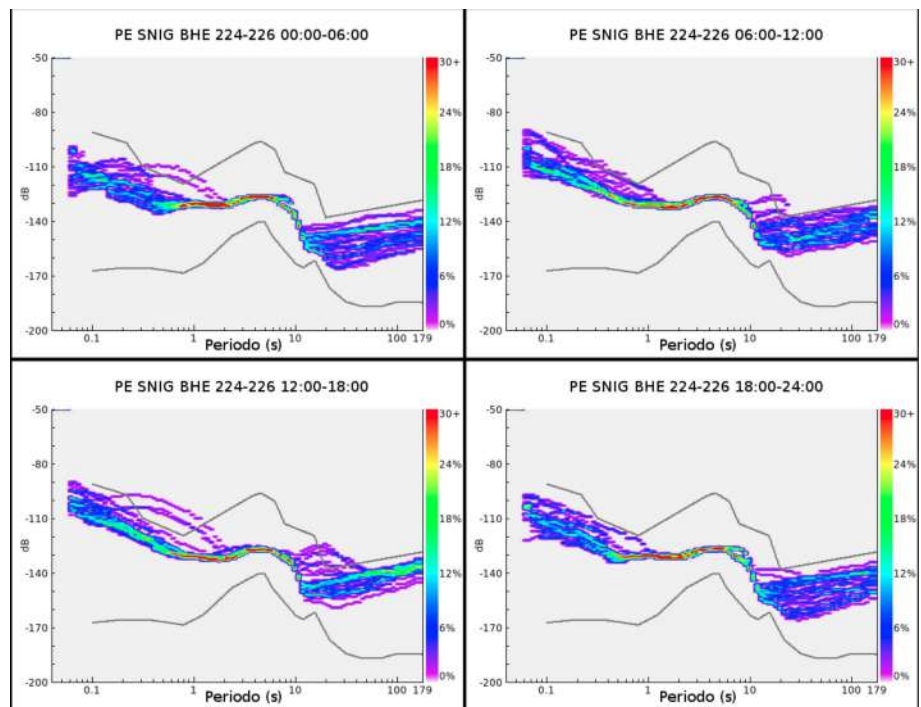


Figura 6.83: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación SNIG.

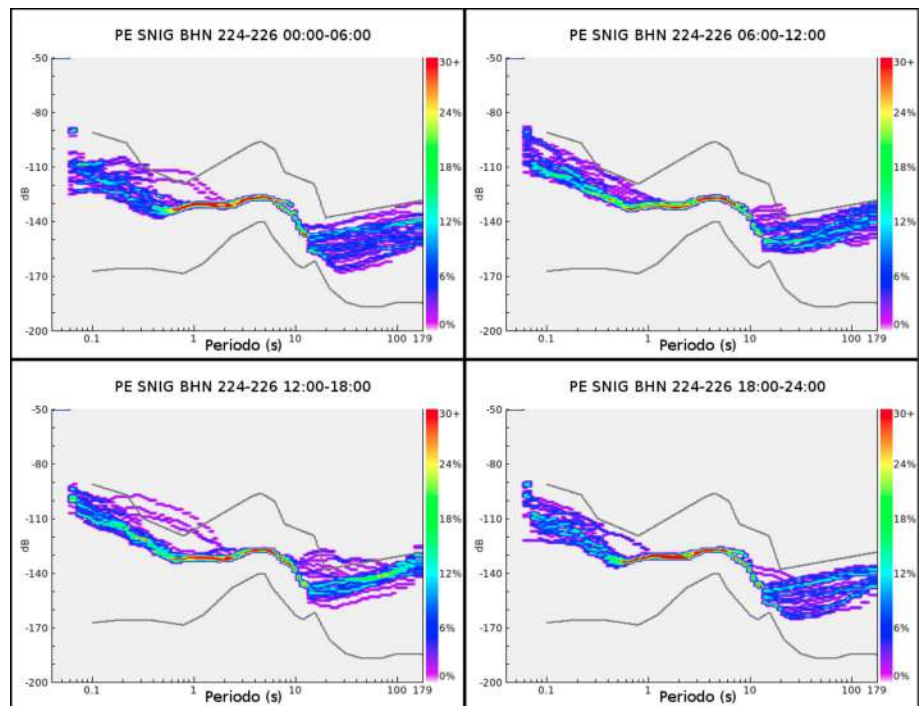


Figura 6.84: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación SNIG.

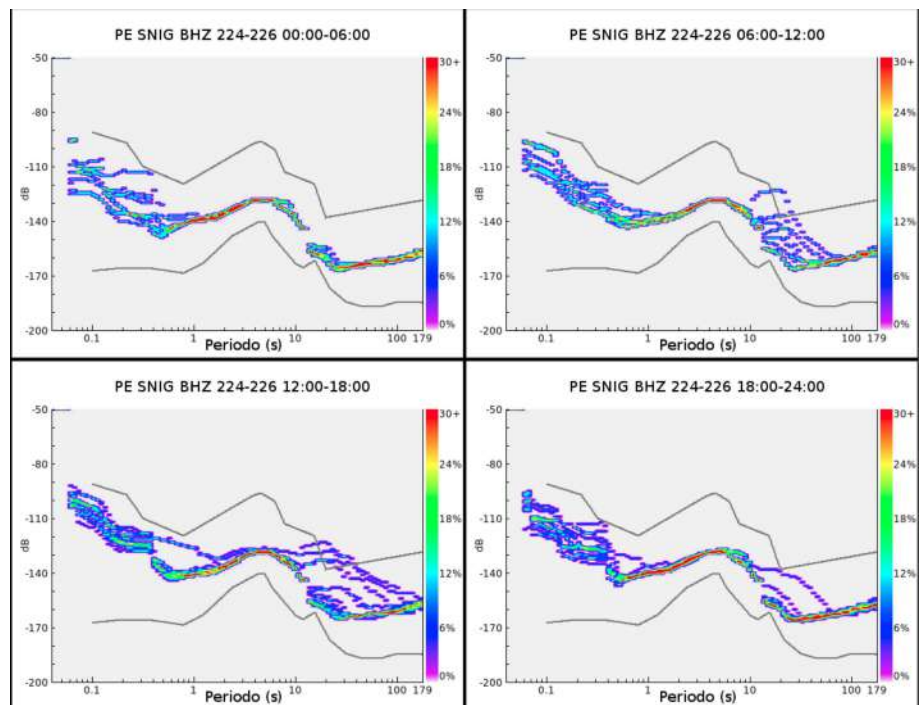


Figura 6.85: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación SNIG.

6.4.1.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.4. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

Para periodos largos, los niveles de ruido en las componentes horizontales son ligeramente superiores durante el invierno, pero la variabilidad es la misma. Para BHZ no se diferencia una variaciones estacionales.

Para periodos cortos, el comportamiento de los niveles de ruido sísmico es el mismo en ambas épocas del año.

El pico de microsismos oceánicos primarios, resalta claramente durante el verano, teniendo una periodo pico al rededor de 15 s. Para el invierno sus niveles se reducen hasta verse opacado por el ruido de periodo largo ambiental. Los microsismos oceánicos secundarios muestran una variación del periodo dominante, el cual se desplaza hacia periodos más largos durante el invierno.

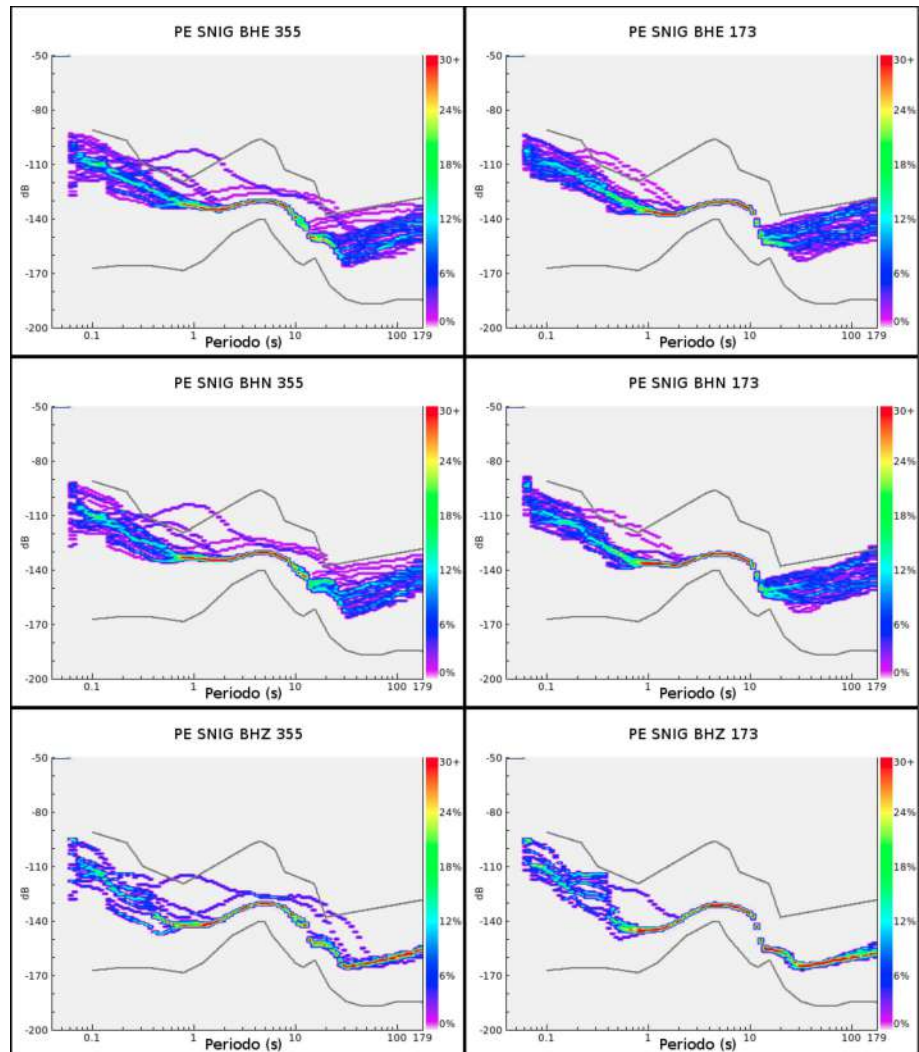


Figura 6.86: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación SNIG. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.4.2 Estación Monzon (MNZN)

La estación sísmica Monzon, esta ubicada en el distrito de Monzon, provincia de Huamalies, departamento de Huanuco. Se ubica en las coordenadas geográficas: 9.25°S, 76.34°O y a una altitud de 871 m.s.n.m.; además, se encuentra a 225 km de la línea de la costa.

Demográficamente, la provincia de Huamalies tiene una densidad poblacional de 23.9 *habitantes/km²*. Además, el distrito de Monzon cuenta con una población de 26,289 *habitantes*, la cual se encuentra distribuida en diversos centros poblados. De estos, Monzon es el más cercano, a 6.5 km al WSW de la estación.

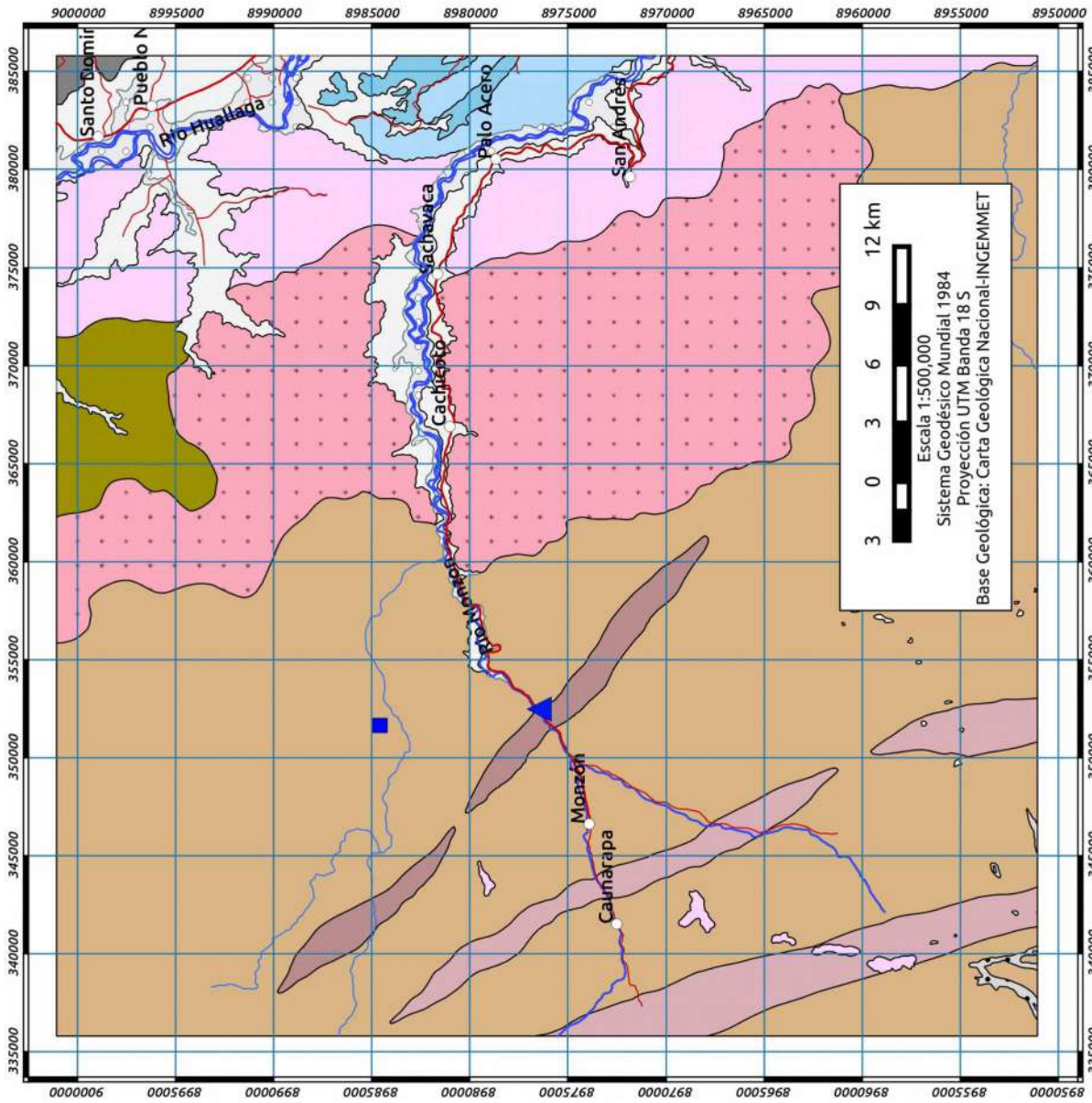
6.4.2.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.87 presenta la geología local de la estación Monzon, se encuentra instalada sobre las rocas del Complejo Marañón. La litología corresponde a una secuencia de rocas metamórficas, específicamente, esquistos (Martinez et al., 1998). A estas rocas, se le ha estimado una edad de 600 ± 50 Ma, correspondiente al Neoproterozoico. Su antigüedad se ve reflejada en su alto grado de metamorfismo.

6.4.2.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo semifrío, lluvioso. En general, es húmedo y con lluvia deficiente en el otoño e invierno.

La estación meteorológica de Cachicoto, ubicada a 8 km al norte de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van de 30 a 24°C en el verano, y de 25 a 22°C en el invierno. La velocidad del viento es relativamente lenta, superando por poco los 1m/s, y sin una dirección preferencial.



ERA	SISTEMA/SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva
Cenozoico	Cuaternario	Cuaternario Fluvial Depósito Aluvial Depósito Fluvio-glacial	Subvolcánica Uchiza Pluton Cachaaca
	Holoceno		
Mesozoico	Neog. Pleist. Mioc.	Formación Tulumayo	
	Jurásico	Formación Aramachay	
	Inferior	Formación Chambara	
Paleozoico	Perm. Sup.	Grupo Mito	
	Carbonífero	Complejo Marañón	
Neoproterozoico		Esquistos	
		Gneiss	

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica MNZN
- Estación Meteorológica (Senamhi)
- Pueblo
- Vías
- Carretera Principal
- Carretera Secundaria
- Drenaje
- Río Principal
- Río Secundario

Figura 6.87: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica MNZN.

6.4.2.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Monzon se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.88, 6.89 y 6.90 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido son buenos para periodos nocturnos. Sin embargo, para las horas del día, y sobre todo para las componentes horizontales, se nota un aumento considerable que llega a superar los límites máximos tanto en periodos cortos como largos.

Para periodos cortos (<2 s), hay un claro aumento de hasta 10 dB en las tres componentes, el cual hace que los niveles de ruido en las componentes horizontales lleguen a alcanzar el límite máximo.

Para periodos largos (>20 s), en BHZ se nota una variación diurna mínima (< 5 dB). Por otro lado, para las componentes horizontales esta variación es mucho mayor, llegando a aumentar hasta en más de 30 dB para horas diurnas.

La banda de microsismos oceánicos conserva sus características en todas las componentes durante todos los intervalos estudiados. Por lo que no presenta variación diurna.

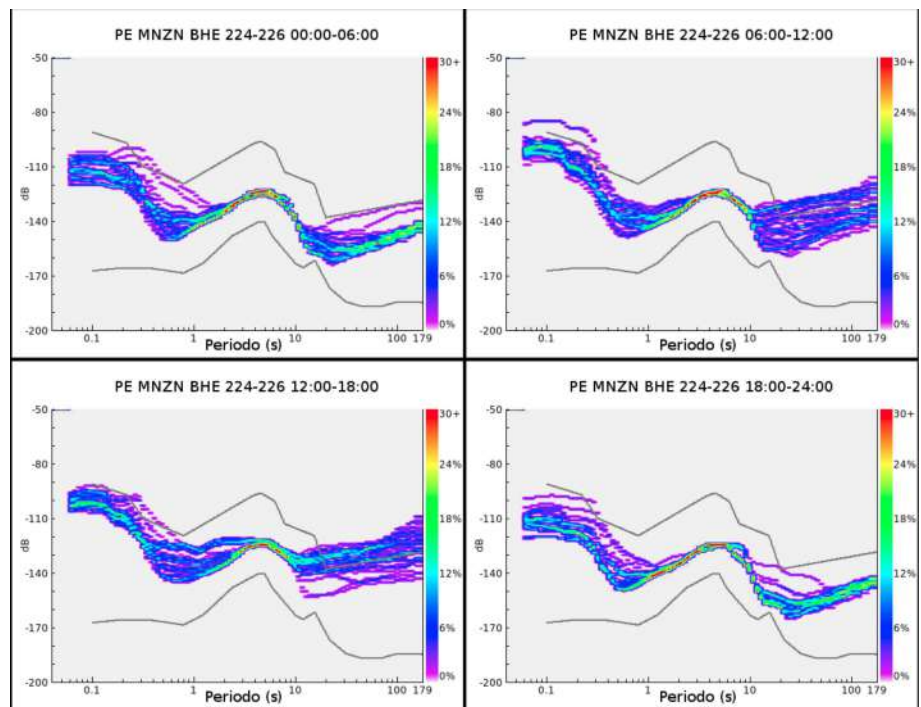


Figura 6.88: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación MNZN.

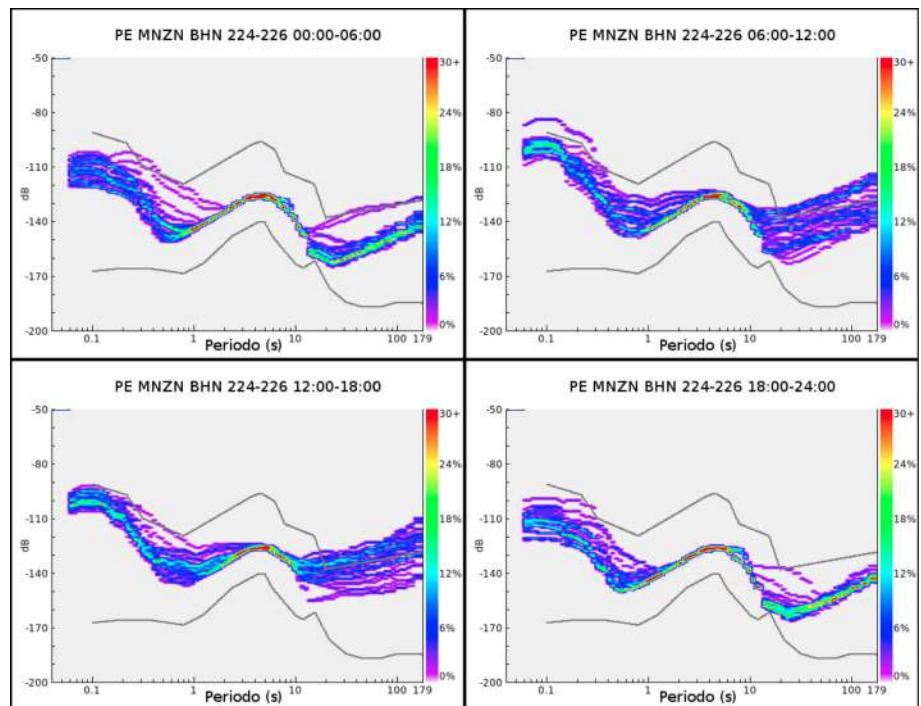


Figura 6.89: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación MNZN.

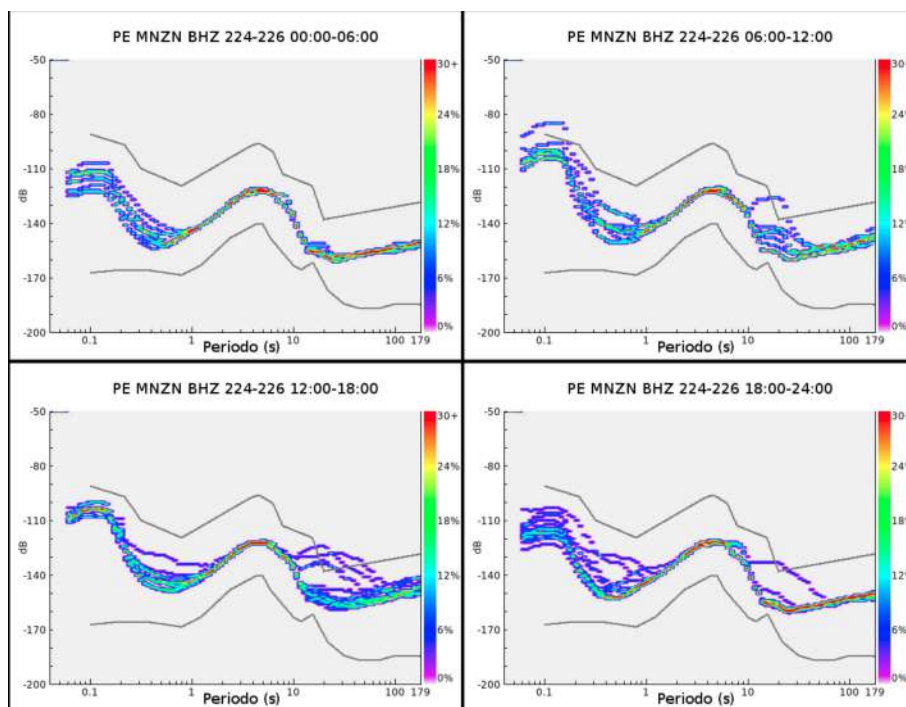


Figura 6.90: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación MNZN.

6.4.2.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.91. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En la banda de periodos largos, el ruido en las componentes BHE y BHN tiene un comportamiento similar en ambas estaciones; sin embargo, es ligeramente menor durante el invierno. Para la componente BHZ no se llega a identificar este cambio estacional.

En la banda de periodos cortos, el ruido presenta las mismas características en todas las componentes, y de igual manera, no se percibe

ningún cambio estacional.

Los microsismos oceánicos secundarios muestran una variación de verano a invierno, el cambio se da en el periodo dominante el cual se desplaza hacia periodos más largos en todas las componentes. Por otro lado, los microsismos oceánicos primarios no son diferenciables en las componentes horizontales, en cambio, para BHZ si se llega a distinguir el pico dominante (~15 s) en el verano, el mismo que decrece (<3 dB) en el invierno.

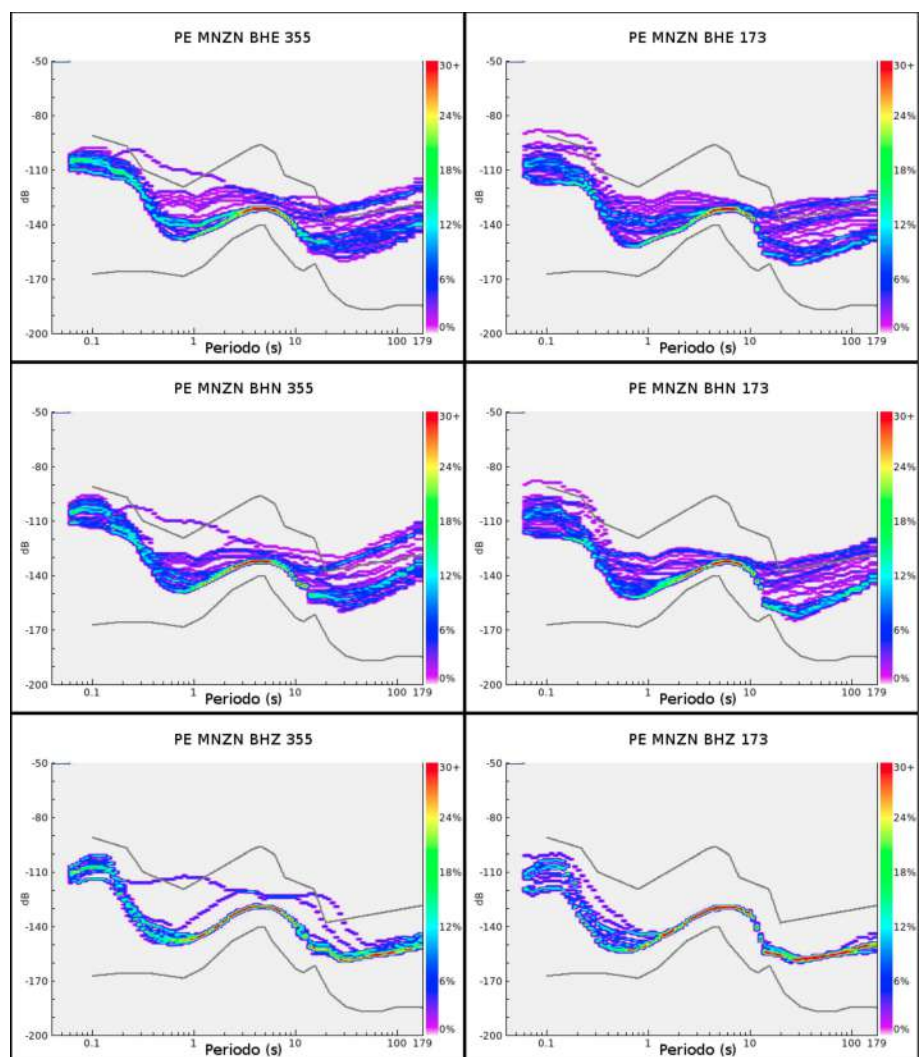


Figura 6.91: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación MNZN. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.4.3 Estación Satipo (STP0)

La estación sísmica Satipo, esta ubicada en el distrito de Coviriali, provincia de Satipo, departamento de Junín. Esta localizada en las coordenadas geográficas: 11.26°S, 74.63°O y a una altitud de 152 m.s.n.m. La distancia a la línea de la costa es de 270 km.

Demográficamente, la provincia de Satipo tiene una densidad poblacional de 14.3 *habitantes/km²*. Por otro lado, la ciudad de Satipo, ubicada a 1.5 km al norte de la estación, es la ciudad cercana más poblada con aproximadamente 33,000 *habitantes*.

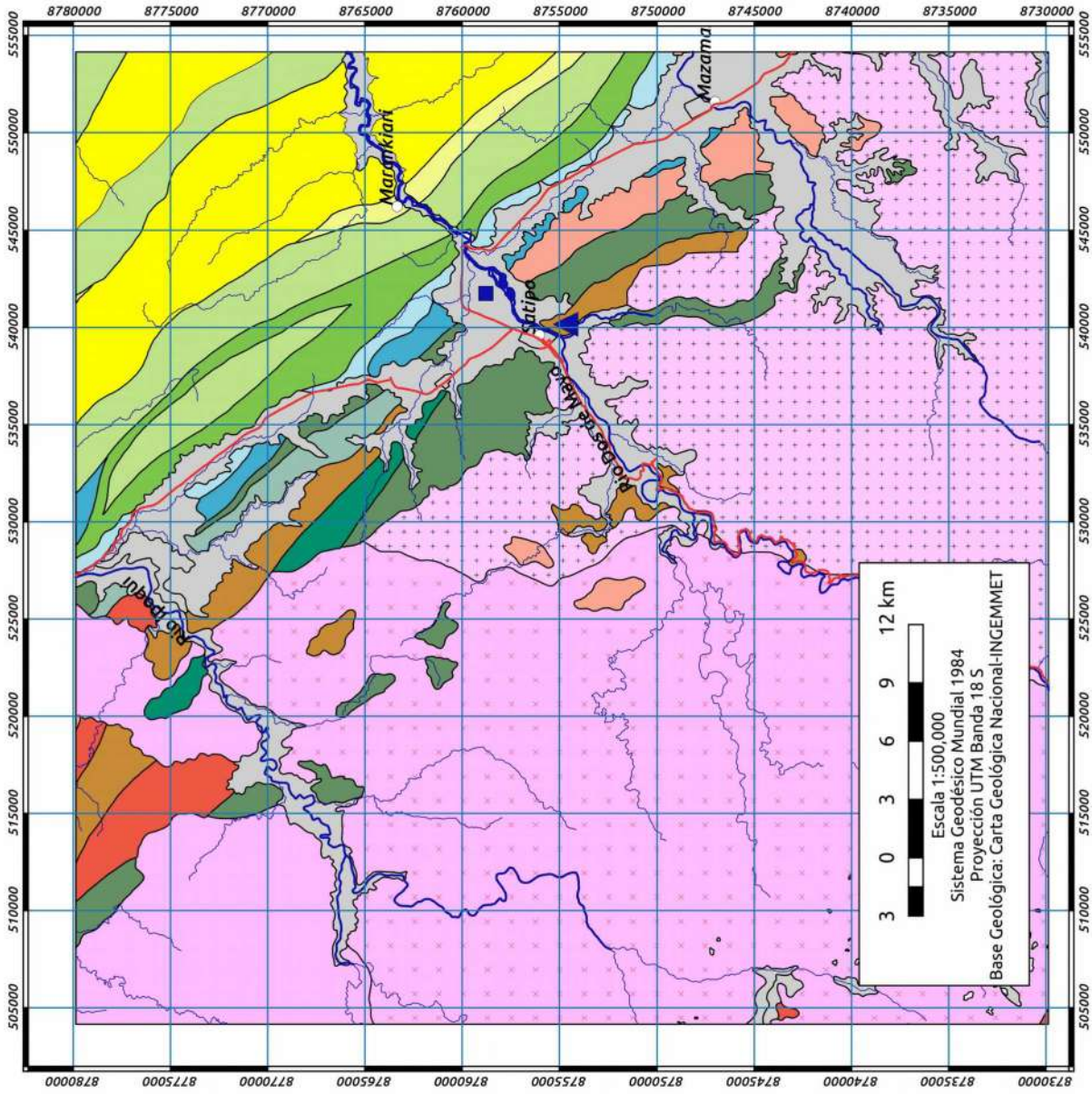
6.4.3.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.92 presenta la geología local de la estación Satipo. Se encuentra instalada sobre las rocas del Grupo Excelsior. En la cercanías de la estación se exponen lutitas, arcillitas y areniscas esquistosas que han sido afectadas por pliegues y fallas. Su grosor es estimado a 600 m (LAGESA-CFGS, 1997). Su edad corresponde al Devónico Inferior.

6.4.3.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona donde se encuentra instalada la estación presenta un clima calificado como cálido, lluvioso, con lluvia abundante en todas las estaciones del año, con humedad relativa calificada como muy húmeda.

La estación meteorológica Satipo, ubicada a 5 km al NNE de la estación sísmica, reporta temperaturas máximas y mínimas que van desde los 35 hasta los 19°C para el verano, y de los 33 hasta 17°C para el invierno. Los vientos presentan velocidades de 2 a 6m/s, sin una dirección predominante.



ERA	SISTEMA SERIE	Unidad Litoestratigráfica	Roca Intrusiva
Cenozoico	Cuaternario	Depósitos Cuaternarios	
	Neógeno	Grupo Huayabamba	
Mesozoico	Paleógeno	Formación Vivian	
		Formación Chonta	
	Cretáceo	Grupo Oriente	Monzogranito San Ramón
		Formación Sarayaquillo	Cuarzo monzonita Carrizal
	Jurásico	Grupo Pucara	
		Grupo Mitu	Monzogranito/diorita
	Pérmico	Grupo Copacabana	
		Grupo Tarma	
	Carbonífero	Grupo Ambo	
		Grupo Excelsior	
Devónico			
	Ordovícico	Formación Cantaya	

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica STPO
- Estación Meteorológica (Senamhi)
- Pueblo
- Vías
- Drenaje
- Río principal
- Río secundario

Figura 6.92: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica STPO.

6.4.3.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Satipo se tomaron los registros de 3 días de semana (12-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.93, 6.94 y 6.95 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido son altos en las componentes horizontales, tanto para periodos largos como cortos. En horas del día el ruido de periodo corto llega a alcanzar el límite máximo, y el ruido de periodo largo lo supera considerablemente. Por otro lado, BHZ muestra niveles aceptables durante todo el día.

Para periodos cortos (<2 s), el ruido aumenta (< 10 dB) en todas las componentes durante periodos diurnos. Los niveles en BHZ son significativamente menores que en BHN y BHE. A pesar del buen grado de compactación de las rocas sedimentarias sobre las cuales se ha instalado la estación, estas variaciones se deben a la complejidad estructural de estas rocas.

Para periodos largos (>20 s), BHZ muestra niveles bajos (<-150 dB) y constantes a lo largo del día. Por otro lado, las componentes horizontales aumentan en más de 20 dB, llegando a sus niveles más altos y superando el nivel máximo entre las horas 12:00-18:00. Estos grandes cambios están favorecidos debido a los contrastes de temperatura y presión atmosférica entre el día y la noche en esta zona de selva alta.

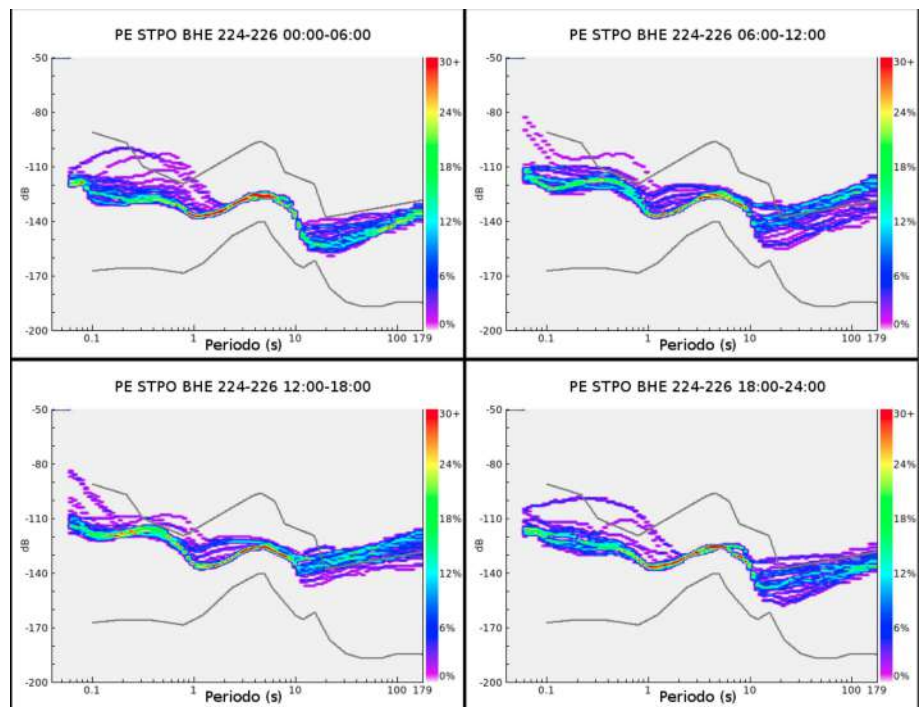


Figura 6.93: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación STPO.

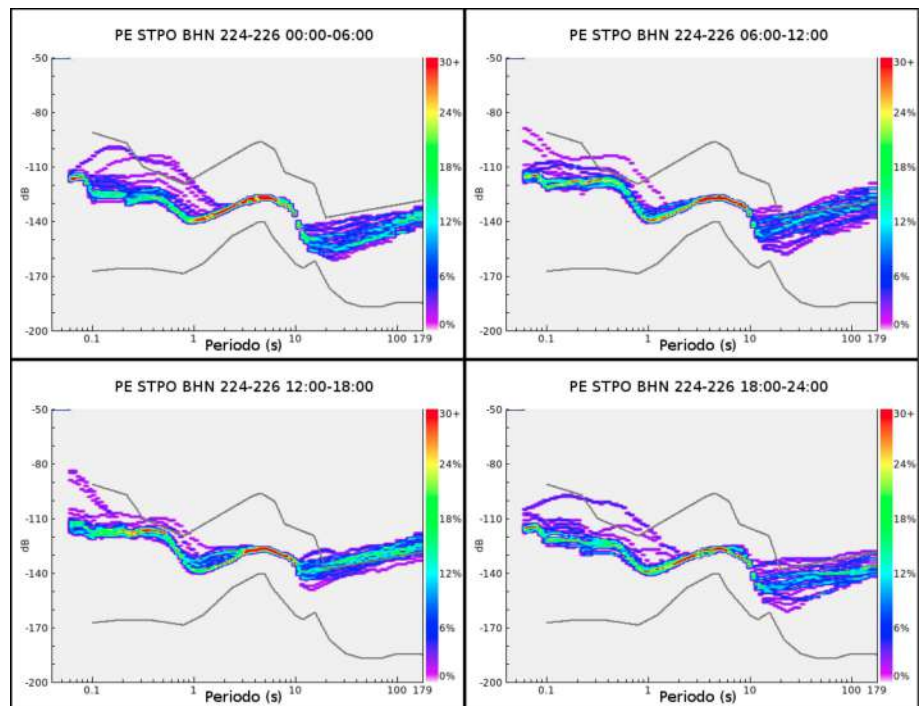


Figura 6.94: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación STPO.

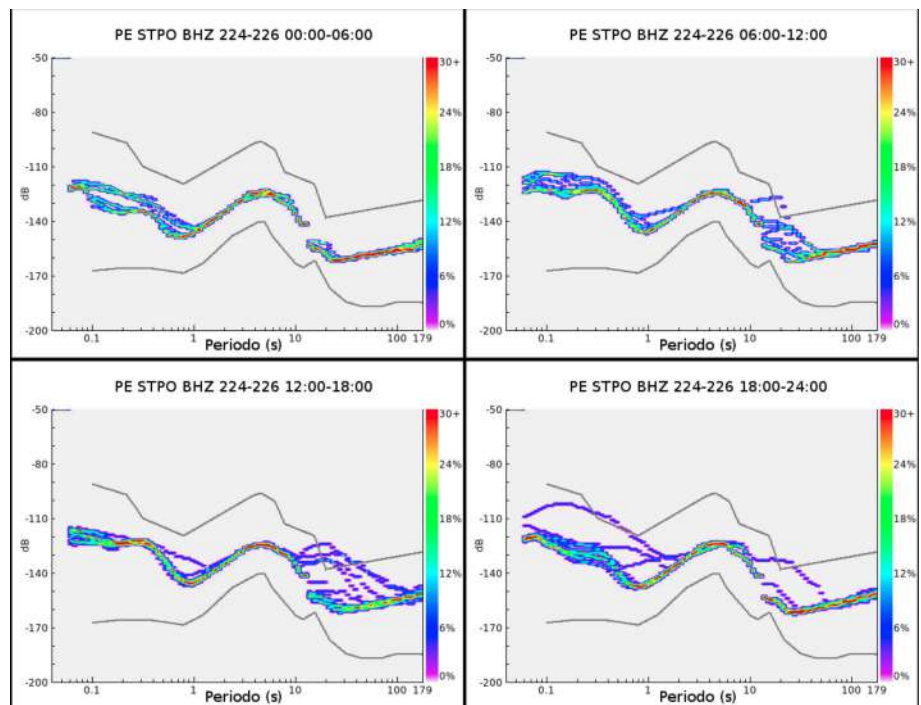


Figura 6.95: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación STPO.

6.4.3.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al inicio y a mediados del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.96. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al inicio del invierno (22 de junio) y a la derecha los correspondientes a mediados del invierno (14 de agosto). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En la banda de periodos largos, para BHE y BHN hay una reducción en el nivel mínimo de ruido a medida que el invierno avanza, sin embargo, la variabilidad para el 14 de agosto es mayor que para inicios del invierno, causando que los niveles máximos sean en ambos casos similares. Por otro lado, en BHZ los niveles son mucho mejores y no se nota un cambio estacional.

Para periodos cortos, no se diferencia una

variación estacional para estas dos épocas del año. Además, haciendo una comparación por componentes se ve que BHZ tiene valores más bajos que las otras.

Los microsismos oceánicos secundarios cambia su periodo dominante a medida que el invierno avanza, este cambio se da hacia un periodo más corto, pasado de 7-9 s a 3-4 s. Adicionalmente, no se llega a diferenciar el pico de microsismos primarios en ningún instancia.

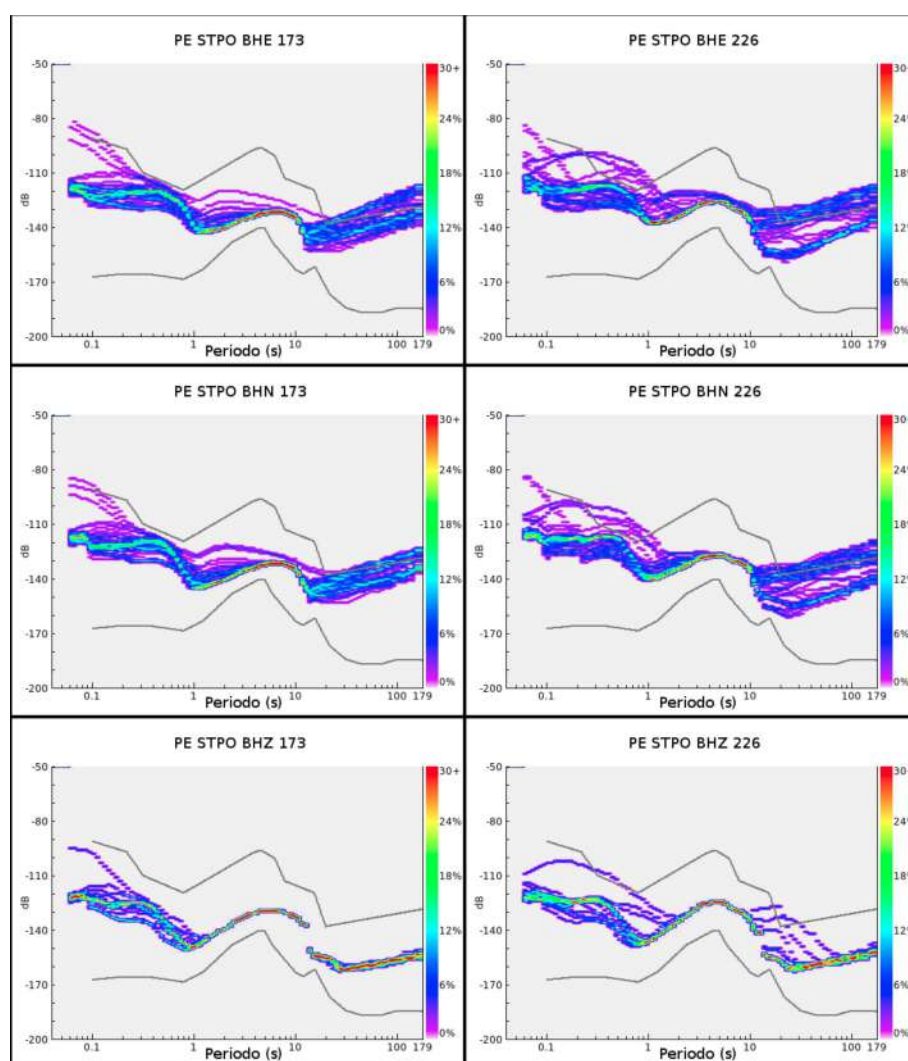


Figura 6.96: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación STPO. A la izquierda los PDFs correspondientes a inicios del invierno (22 de junio) y a la derecha los PDFs correspondientes a mediados del invierno (14 de agosto). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.4.4 Estación Yurimaguas (YRM)

La estación sísmica Yurimaguas se encuentra instalada en el distrito de Yurimaguas, provincia de Alto Amazonas, departamento Loreto. Se ubica en las coordenadas geográficas: 5.89°S, 76.12°O y a una altitud de 146 m.s.n.m. La distancia a la línea de la costa es de 420 km.

Demográficamente, Alto Amazona presenta una densidad poblacional de 6.2 *habitantes/km²*. Localmente, la ciudad de Yurimaguas cuenta con una población de 63,427 *habitantes* y se encuentra a 2 km al E de la estación.

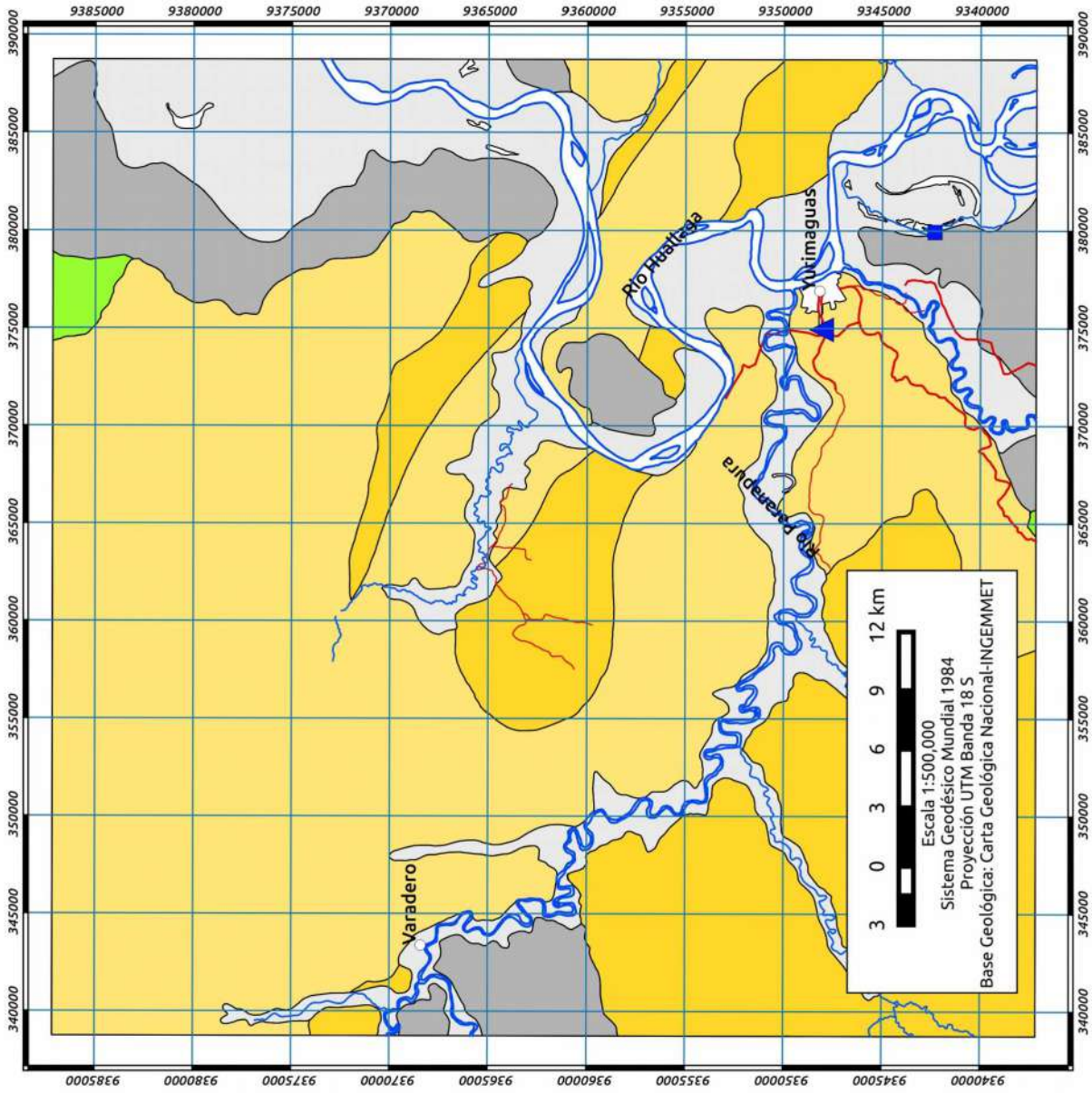
6.4.4.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.97 presenta la geología local de la estación Yurimaguas. La estación ha sido instalada sobre la Formación Ipururo, su litología es limoarcillítica poco consolidada, presenta también niveles conglomerádicos con clastos redondeados de areniscas finas gris blanquecinas fácilmente disgregables (Sánchez et al. (1997). Se le estima un espesor de 1,500 *metros* y una edad que corresponde al Plioceno.

6.4.4.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo Selva Tropical Muy Húmeda. Este clima es muy húmedo, con temperaturas semicálidas y con precipitaciones intensas.

Según los datos de la estación meteorológica San Ramon, ubicada a 7 km al SE de la estación sísmica, la temperatura máxima y mínima varía de 33°C a 22°C para el verano y de 32°C a 20°C en el invierno. La dirección del viento es muy errática y no suele sobrepasar los 2 *m/s*.



ERA	SISTEMA	SERIE	Unidad Litoestratigráfica
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos Fluviales
			Depósitos Aluviales
	Neogeno	Pleistoceno	Formación Ucayali
		Plioceno	Formación Ipauru
		Mioceno	Formación Chambira
	Paleogeno	Oligoceno	Formación Pozo
Eoceno			

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica YRM
- Estación Meteorológica (Senamhi)
- Pueblo
- Drenaje
- Río Principal
- Río Secundario
- Vías
- Vía Principal
- Vía Secundaria

Figura 6.97: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica YRM.

6.4.4.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Yurimaguas se tomó el registro del día 11 de agosto del 2015. Seguidamente, este registro fue dividido en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.98, 6.99 y 6.100 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido son altos tanto en periodos cortos como largos, debido al tipo de suelo sobre el cual la estación ha sido instalada. Además, la variabilidad diurna es igualmente grande, debido probablemente a la cercanía de la ciudad de Yurimaguas, al dinamismo del Río Huallaga y a la interacción entre el sistema de vientos con la vegetación.

Para periodos cortos (<2 s), el ruido sísmico en todas las componentes es alto a lo largo de todo el día. Aun más, durante el intervalo 06:00-18:00 es igual o incluso superior por un par de decibelios al límite máximo. Estos altos niveles son explicados por la litología de tipo sedimentario de los alrededores de la estación.

Para periodos largos (>20 s), los niveles son muy altos en las componentes horizontales, además, muestran una variación diurna que los hace superar el límite máximo. Para BHZ, es estable durante el día, excepto para el intervalo 12:00-18:00 horas.

Los microsismos oceánicos son detectables, a pesar de que la estación se encuentra muy alejada de la línea de costa.

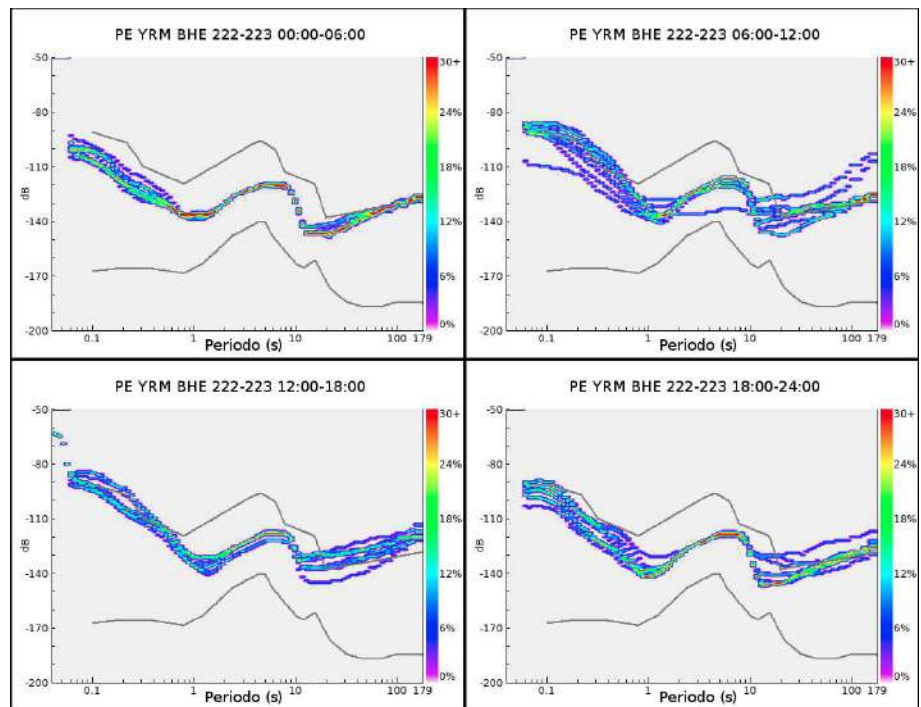


Figura 6.98: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación YRM.

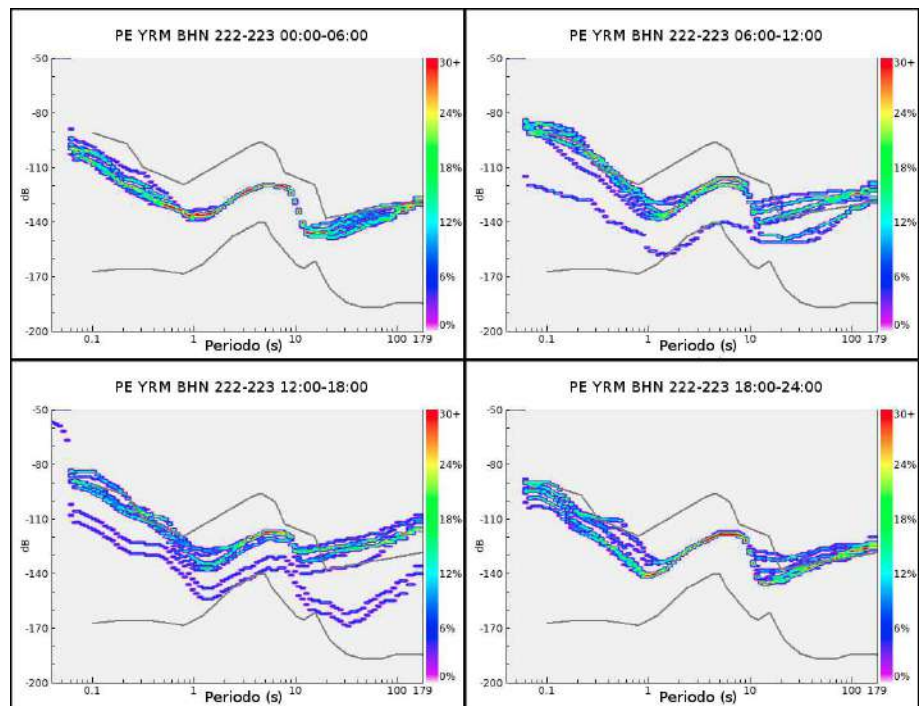


Figura 6.99: Variación Diurna del ruido sísmico de la componente BHN de la estación YRM.

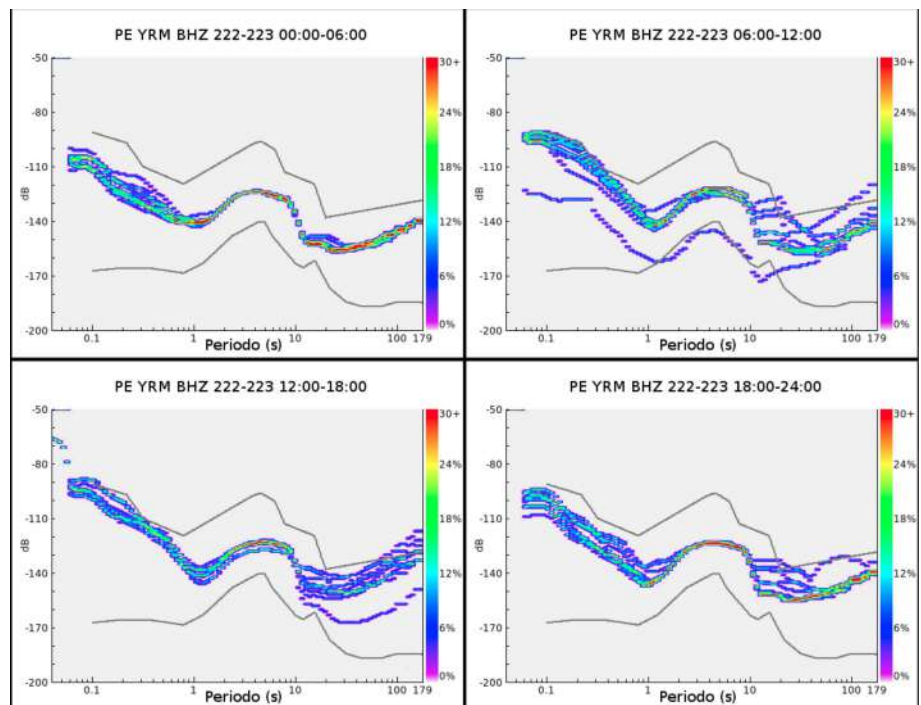


Figura 6.100: Variación Diurna del ruido sísmico de la componente BHZ de la estación YRM.

6.4.4.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico de los días correspondientes al verano y al invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.101. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha para el invierno (11 de agosto). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

Para periodos largos, los niveles de ruido sísmico en todas las componentes son ligeramente más altos durante el invierno. Este incremento es más evidente en la componente BHE.

Para periodos cortos, no se diferencia algún cambio estacional en los niveles de ruido sísmico en ninguna de las componentes. Sin embargo, durante el invierno la variabilidad es

más fuerte, lo que hace que se lleguen a superar los niveles máximos.

Los microsismos oceánicos secundarios aumentan su intensidad para el invierno, junto con un alargamiento del periodo dominante. Los microsismos oceánicos primarios no son notorios, salvo en la componente BHZ durante el verano donde llega a resaltar por sobre los niveles de ruido de periodo largo.

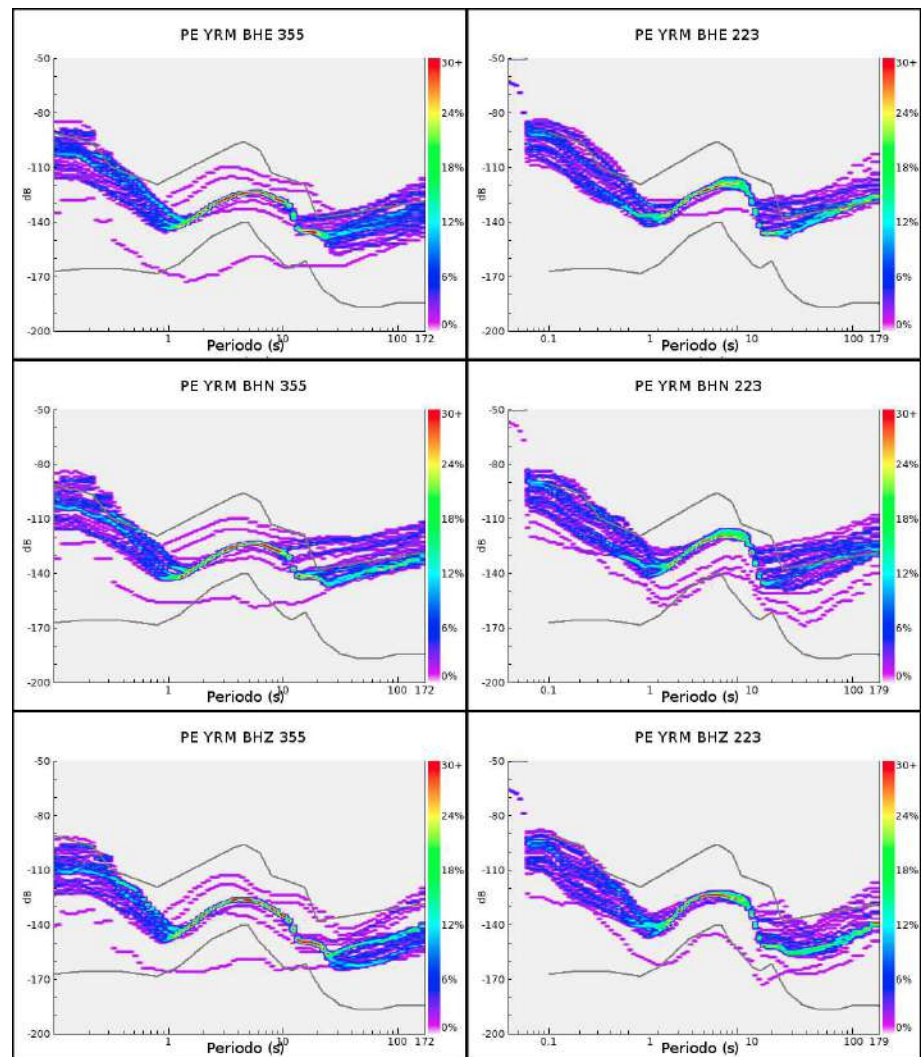


Figura 6.101: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación YRM. A la izquierda los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (11 de agosto). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.4.5 Estación Pucallpa (PUC)

La estación sísmica Pucallpa se encuentra en el distrito de Yarinacocha, provincia de Coronel Portillo, departamento de Ucayali. Se ubica en las coordenadas geográficas: 8.39°S, 74.66°O y a una altitud de 152 m.s.n.m. La estación se encuentra separada del litoral por 435 km.

Demográficamente, la provincia tiene una densidad poblacional de 9.8 habitantes/km². Además, la ciudad más populosa en las cercanías es Pucallpa (211,651 habitantes), ubicada a 9.7 km al noreste.

6.4.5.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.102 presenta la geología local de la estación Pucallpa. La geología sobre la cual se ha instalado la estación corresponde a Depósitos Aluviales holocénicos los cuales se presenta en toda el área como llanuras aluviales que sobreyacen y cubren los depósitos infrayacentes, los cuales son capas sedimentarias de grandes espesores (De La Cruz et al., 1997). Estas condiciones, desafortunadamente, son ideales para la amplificación del ruido sísmico, pero la estación PUC ha sido acondicionada lo mejor posible para reducir los niveles de ruido sísmico.

6.4.5.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presenta un clima de tipo Selva Tropical Húmeda. En general, es muy lluvioso y húmedo con temperaturas cálidas.

Utilizando los datos de la estación meteorológica convencional Pucallpa, ubicada a 11 km al ESE de la estación sísmica, se ve que la temperatura para el verano del 2015 presentó máximas de 34°C y mínimas de 22°C. Mientras que en invierno solo alcanzan los 32°C y bajan hasta 22°C. Adicionalmente, la velocidad del viento promedia los 4 m/s con una dirección preferencial noroeste.

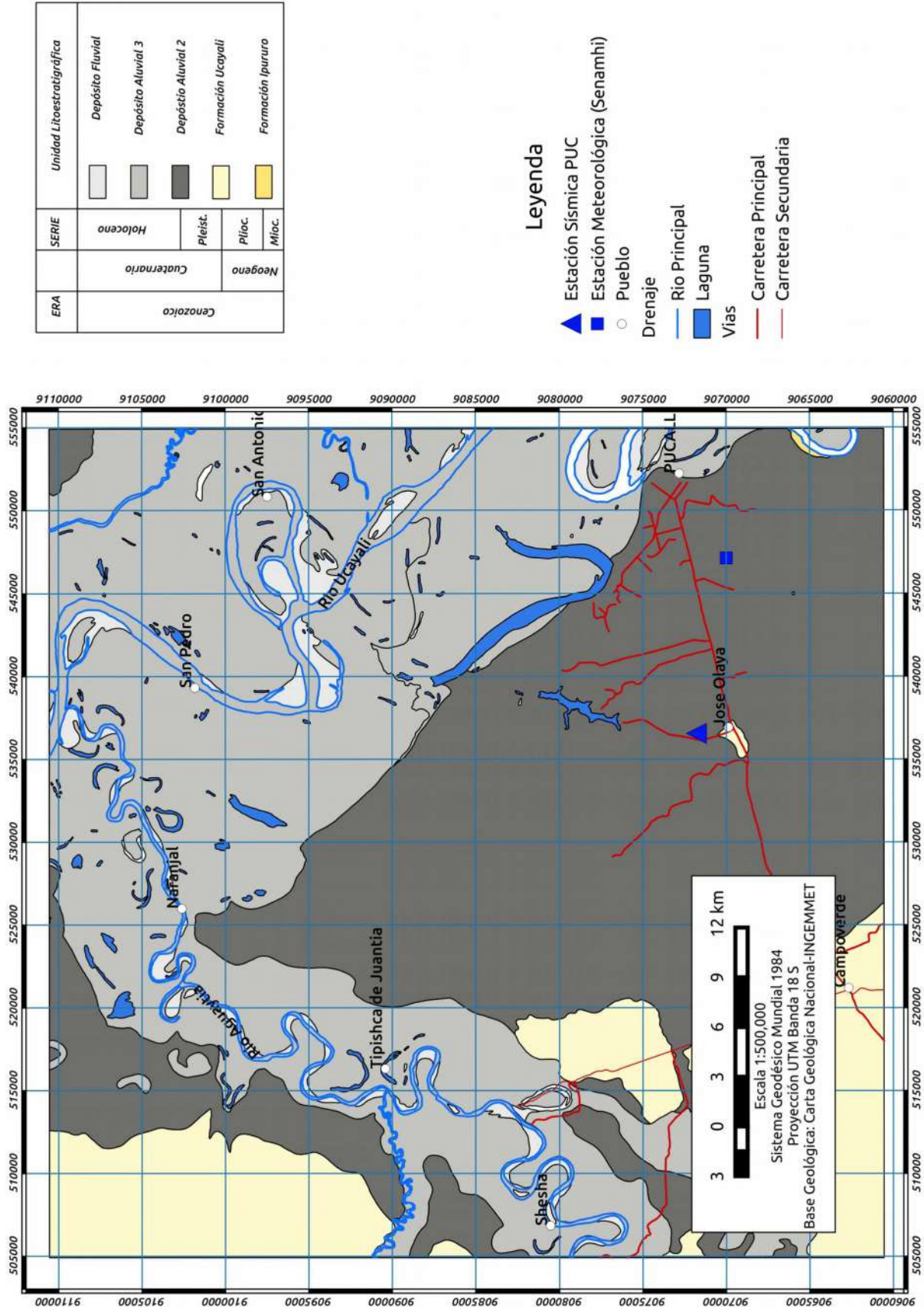


Figura 6.102: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica PUC.

6.4.5.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Pucallpa se tomaron los registros de 5 días de semana (10-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.103, 6.104 y 6.105 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles son muy altos a lo largo de todo el espectro. Solo se encuentran niveles adecuados en BHZ para periodos largos. La principal causa se encuentra en la litología de los alrededores, la variabilidad de las componentes ambientales en la zona de selva baja y el efecto antropogénico, los mismos que no se pueden controlar, tan solo reducir sus efectos.

Para periodos cortos (<2 s), los niveles del ruido en las tres componentes superan por ~5 dB el límite máximo, excepto en el intervalo 00:00-06:00 donde son ligeramente menores. Estos niveles elevados y la variación diurna son producto tanto del tipo de suelo como a la actividad de la ciudad de Pucallpa, además, del posible efecto de la interacción del sistema de viento y la vegetación, y el dinamismo de los ríos cercanos (Ucayali y Aguaytia).

Para periodos largos (>20 s), se registran valores altos en BHN y BHE, los cuales se elevan (~3 dB) durante los periodos diurnos, de modo que llegan a superar el límite máximo. Por otro lado, la componente BHZ muestra valores más bajos y estables durante todo el día, mostrando su mayor variabilidad en el intervalo de 06:00-12:00.

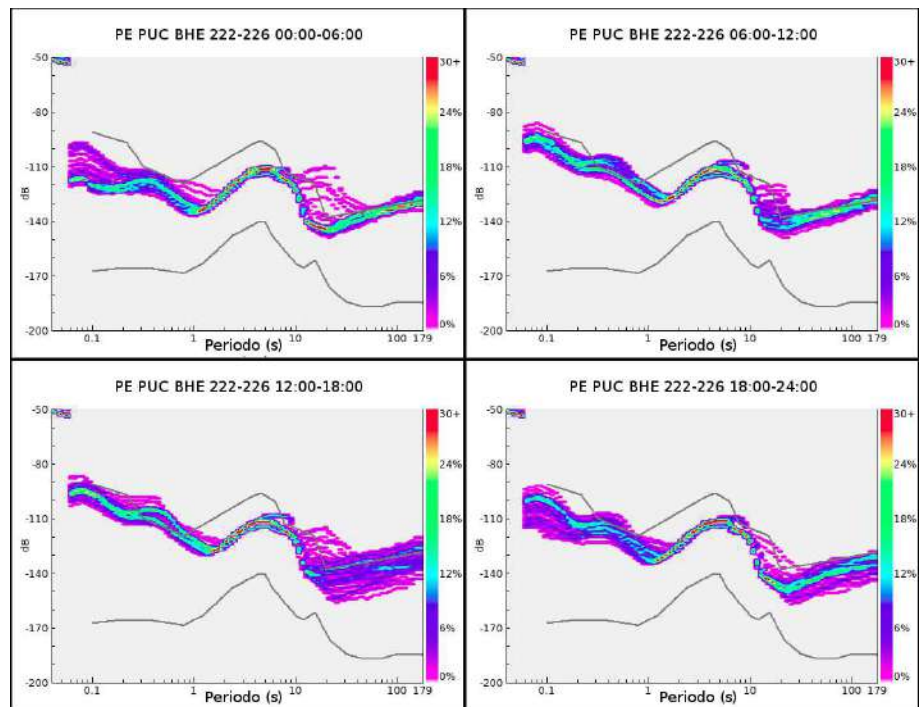


Figura 6.103: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación PUC.

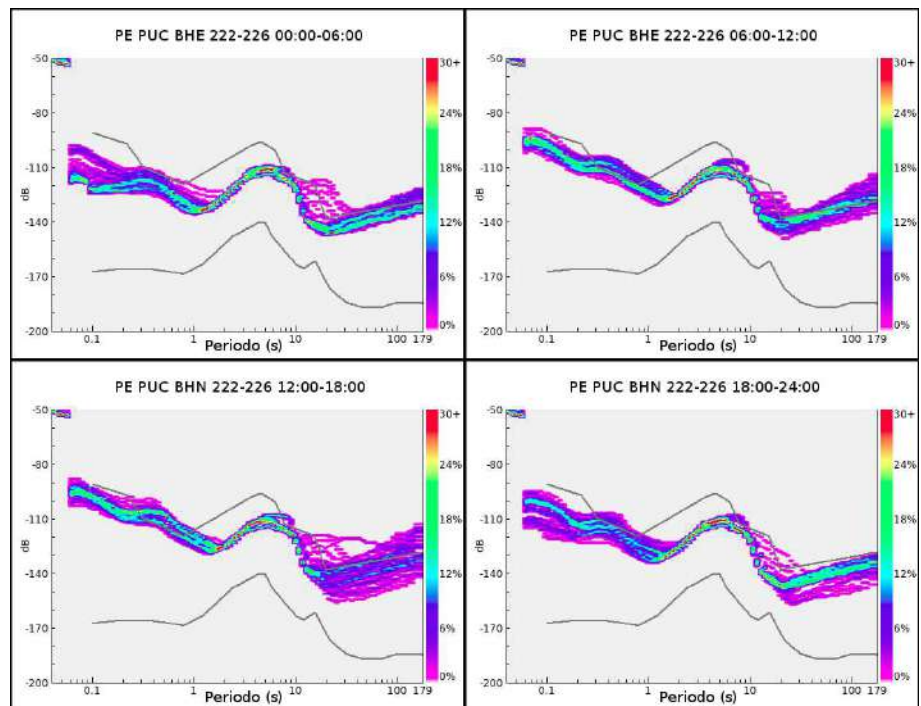


Figura 6.104: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación PUC.

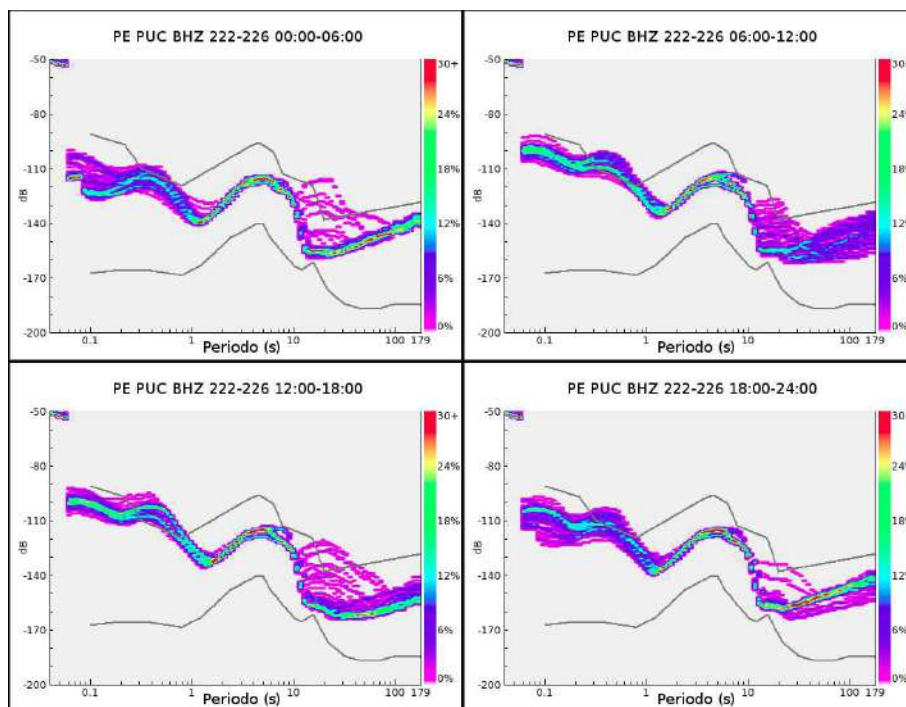


Figura 6.105: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación PUC.

6.4.5.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruido sísmico del verano y del otoño del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.106. En el lado izquierdo se tienen los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (17 de agosto). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

Para la banda de periodos largos, el ruido es ligeramente inferior en el invierno con respecto al verano. Este descenso esta presente en las tres componentes. A su vez, BHZ muestra niveles más bajos de ruido con respecto a las componentes horizontales.

Para periodo cortos, hay un aumento considerable en los niveles de ruido para el invierno. Este cambio hace que los niveles máximos sean superados. Este efecto es incluso

más sustancial en la componente BHZ, la cual muestra niveles más altos.

Los microsismos oceánicos secundarios muestran niveles elevados en ambas estaciones, a pesar de que la estación se encuentre distante del océano. En términos generales, la intensidad no varía de una componente a otra, sin embargo, para el invierno se llega a distinguir 2 picos frecuenciales, uno en 5 y otro en 9 s. Esta diferenciación no es tan notoria en el verano, donde solo se distingue un pico en 6 s.

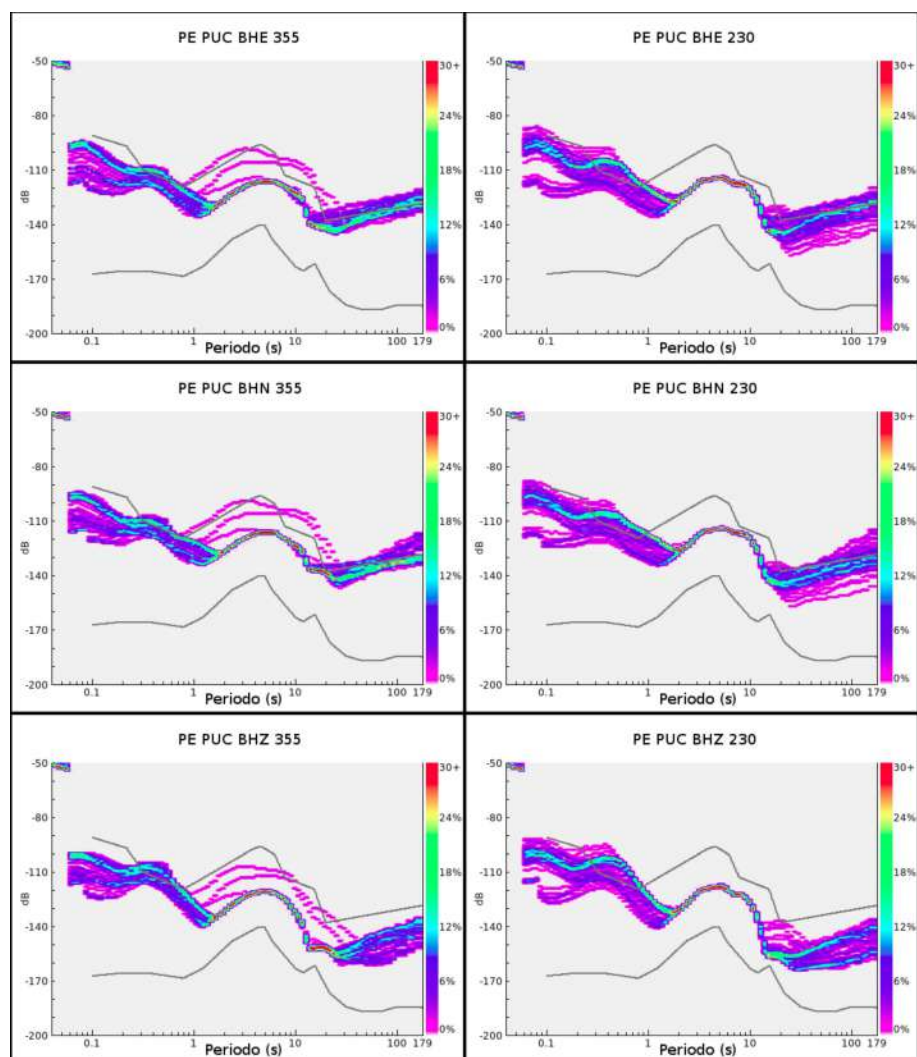


Figura 6.106: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación PUC. A la izquierda los PDFs correspondientes al inicio del verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (17 de agosto). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

6.4.6 Estación Iquitos (IQT)

La estación sísmica Iquitos se encuentra bajo la jurisdicción del distrito San Juan Bautista, provincia de Maynas, departamento de Loreto. Se ubica en las coordenadas geográficas: 3.81°S, 73.32°O y a una altitud de 113 m.s.n.m. Es la estación más separada del litoral (a más de 800 km).

La densidad poblacional de la provincia de Maynas es relativamente baja con 4.6 *habitantes/km²* . Sin embargo, la ciudad de Iquitos (437,376 *habitantes*) se encuentra a tan a 11 km al NE de la estación.

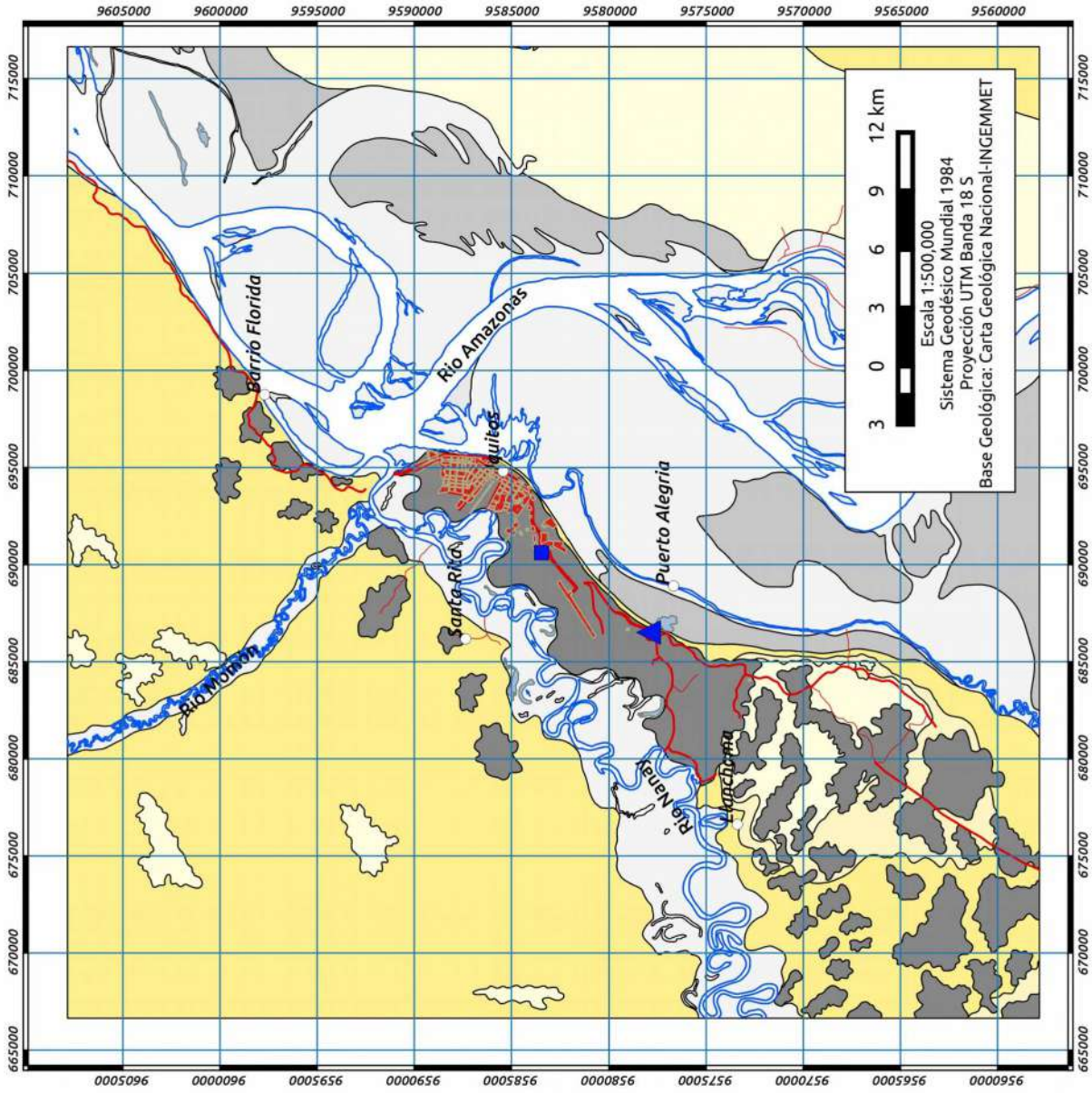
6.4.6.1 Geología

El Mapa de la Figura 6.107 presenta la geología local de la estación Iquitos. La litología sobre la cual se encuentra instalada corresponde a la Formación Iquitos. Litológicamente se hallan compuestas por sedimentos inconsolidados de gravas, arenas, limos y arcillas (Sanchez et al., 1999). Geogronológicamente es posicionada en el Pleistoceno.

6.4.6.2 Clima

Según la clasificación de Thornthwaite, la zona presente un clima de tipo Selva Tropical Muy Húmeda. En general, es muy lluvioso y húmedo con temperaturas semi-cálidas.

La estación meteorológica convencional Puerto Almendra, ubicada a 7 km al NE de la estación sísmica, reporta temperaturas para el verano e invierno del 2015 que van de 32°C a 22°C. Adicionalmente, la velocidad del viento no suele sobrepasar los 2m/s con una dirección preferencial hacia el este.



ERA	SISTEMA	SERIE	Unidad Litestratigráfica
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósito Fluvial
			Depósito Aluvial
			Depósito Aluvial Pleistocénico
	Neogeno	Plioceno	Formación Iquitos
			Formación Nauta
			Formación Ipururo
		Mioc.	

Leyenda

- ▲ Estación Sísmica IQT
- Estación Meteorológica (Senamhi)
- Pueblo
- Ciudad
- Vías
- Carretera Secundaria
- Carretera Principal
- Drenaje
- Río Principal
- Laguna

Figura 6.107: Mapa Geológico del entorno de la Estación Sísmica IQT.

6.4.6.3 Variación Diurna del Ruido Sísmico

Para el análisis de la variación diurna del ruido sísmico en la estación Iquitos se tomaron los registros de 5 días de semana (10-14 de Agosto del 2015). Seguidamente, estos registros fueron agrupados en paquetes de 6 horas según los intervalos siguientes: 00:00-06:00, 06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-24:00 (zona horaria local).

En las Figuras 6.108, 6.109 y 6.110 se muestra las representaciones del ruido sísmico para las componentes BHE, BHN y BHZ respectivamente.

En general, los niveles de ruido de periodo corto y largo, superan en toda instancia al límite máximo. El factor determinante para estos elevados niveles es la litología sedimentaria cuaternaria sobre el cual se encuentra instalada la estación. Por otro lado, la banda de microsismos si muestra niveles aceptables, esto se debe a que el suelo inadecuado es compensado con la lejanía del Océano Pacífico (> 800 km).

Para periodos cortos (<2 s), el ruido siempre esta por encima del límite máximo, sobre todo en el intervalo 06:00-18:00 donde lo excede hasta en ~10 dB. Esto se da debido a la suma de efectos del terreno, ruido cultural generado por la ciudad de Iquitos, cercanía del Río Amazonas y el efecto del viento interactuando con la vegetación.

Para periodos largos (>20 s), los niveles son altos en todas las componentes. Además, en las componentes horizontales hay una variación diurna que hace alcanzar valores de hasta -120 dB para las horas diurnas.

La banda de microsismos oceánicos no muestra una variación diurna. Sin embargo, la potencia espectral en las componentes horizontales es mucho mayor que en BHZ.

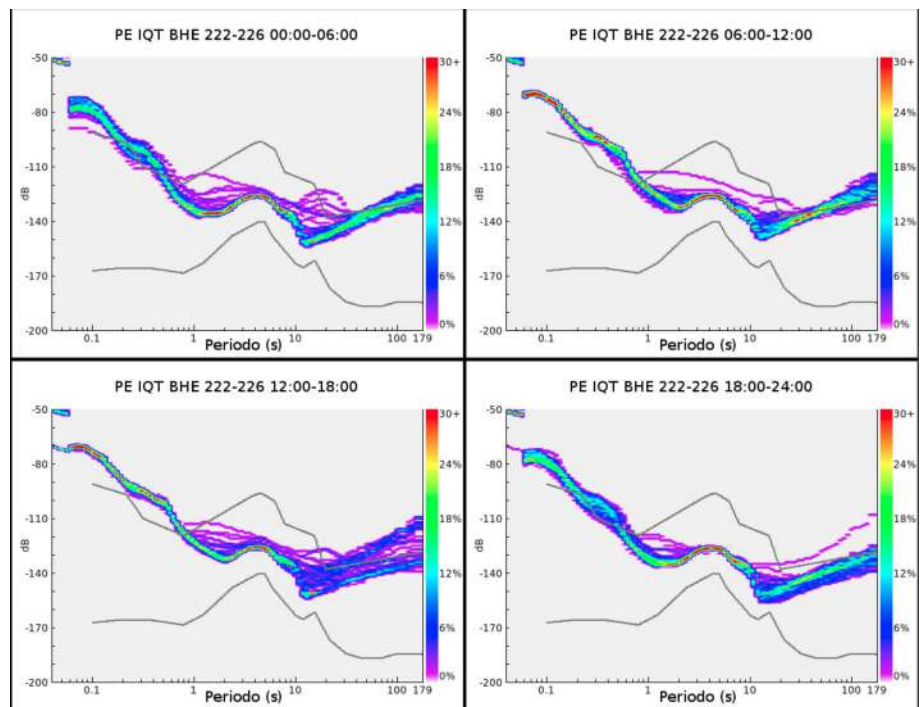


Figura 6.108: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHE de la estación IQT.

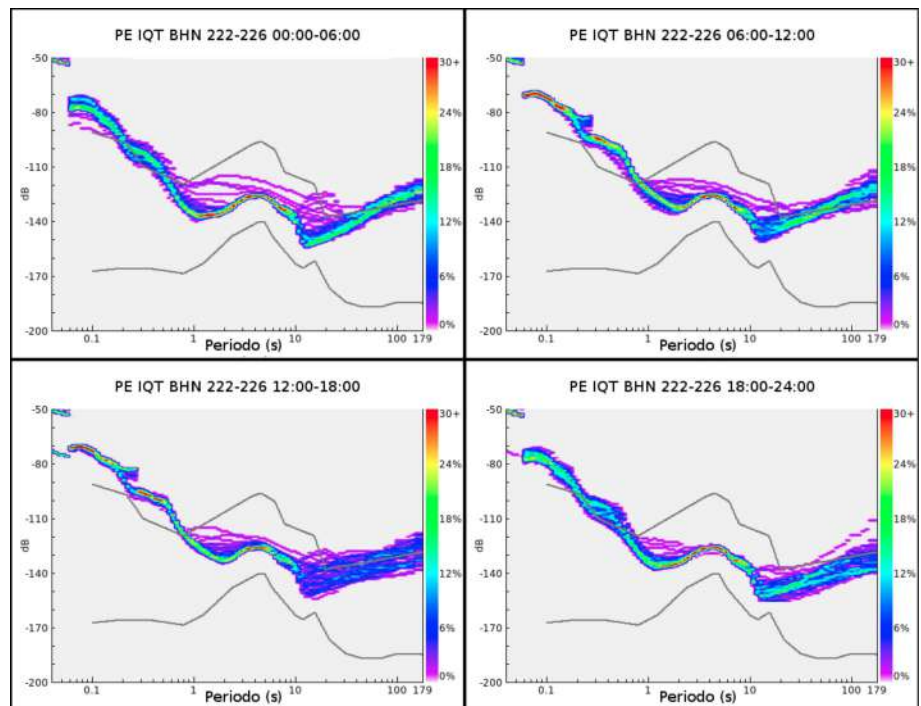


Figura 6.109: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHN de la estación IQT.

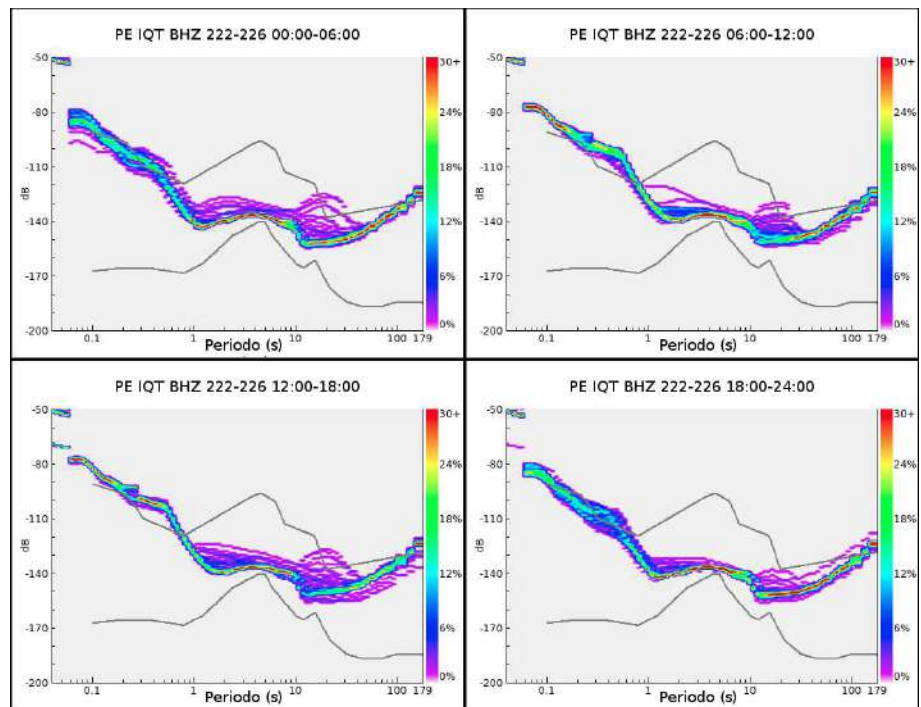


Figura 6.110: Variación Diurna del ruido sísmico en la componente BHZ de la estación IQT.

6.4.6.4 Variación Estacional del Ruido Sísmico

La variación estacional es analizada comparando los niveles de ruidos de los días correspondientes al inicio del verano y del invierno del hemisferio sur. Para esto, fueron procesadas 24 horas de registro en cada caso.

Los resultados se muestran en la Figura 6.111. En el lado izquierdo se tiene los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente véanse los PDFs de las respectivas componentes (BHE, BHN y BHZ).

En la banda de periodos largos, los niveles de ruido en cada componente son similares para ambas épocas del año, sin embargo, la variabilidad es mayor durante el invierno. Por otro lado, BHZ muestra niveles más bajos (~ 10 dB) que el de las otras componentes.

En el caso de los periodos cortos, hay un ligero aumento en todas las componentes para el invierno con respecto al verano. Además de este

aumento, también se detecta un aumento en la variabilidad durante el invierno.

Para los microsismos oceánicos secundarios no se nota un cambio en las características frecuenciales, pero si en la intensidad en general. Disminuyendo ~ 3 dB para el invierno. Este cambio esta presente en todas las componentes. Además, a pesar de la gran separación entre la estación y las costas del Pacífico, aun se llega a distinguir el pico de microsismos oceánicos primarios durante el verano.

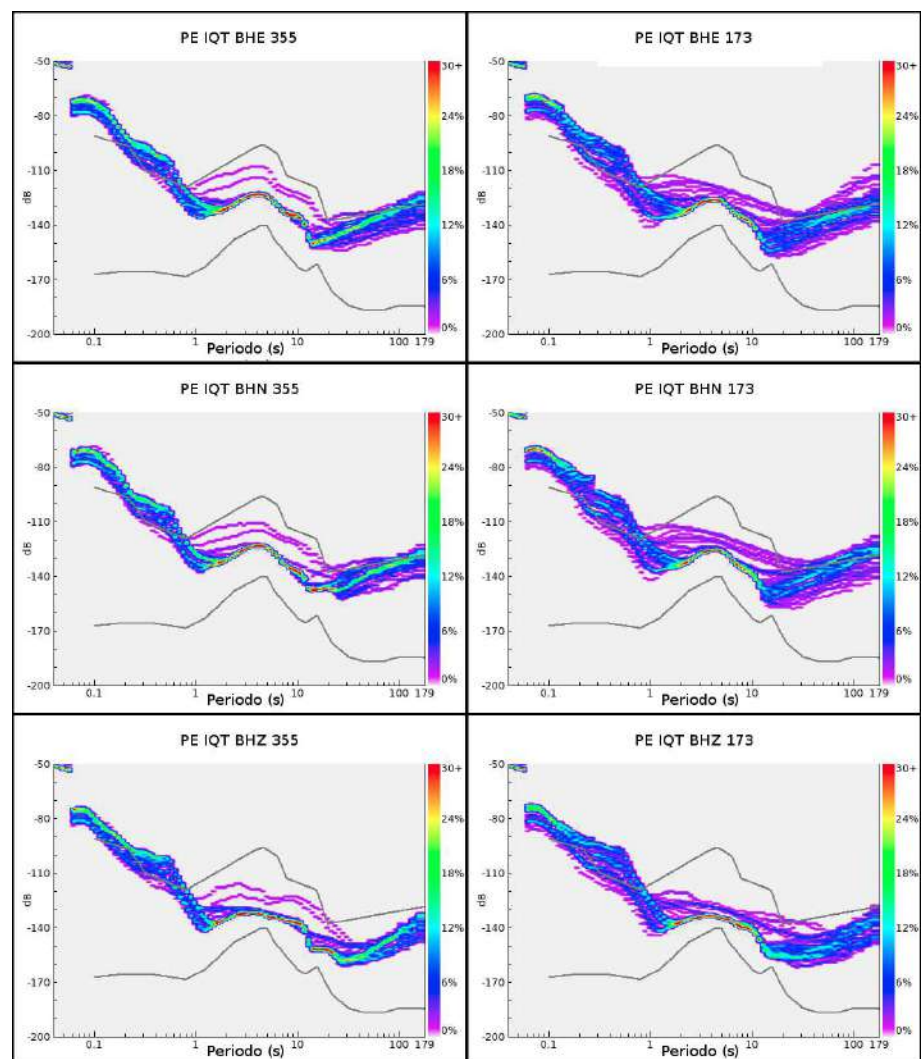


Figura 6.111: Variación Estacional del ruido sísmico en la estación IQT. A la izquierda los PDFs correspondientes al verano (21 de diciembre) y a la derecha los PDFs correspondientes al invierno (22 de junio). En orden descendiente son mostradas las componentes BHE, BHN y BHZ.

CONCLUSIONES

- 1 Se ha realizado la evaluación de los niveles de ruidos sísmico para 22 estaciones sísmicas de banda ancha de la Red Sísmica Satelital para la Alerta Temprana de Tsunamis a cargo del Instituto Geofísico del Perú, en un rango espectral de interés que va desde 65 hasta 0.04 s. Estos límites han sido determinados según la Frecuencia de Niquist y los parámetros de segmentación de la información.
- 2 Se corrobora que la Función de Probabilidad de la Densidad de Potencia Espectral es una excelente herramienta para la evaluación de los niveles de ruido sísmico.
- 3 Para estaciones de Ante-Arco, es el grupo que mejores niveles de ruido sísmico presenta, variando fundamentalmente por la litología. Dentro de ellas, QLK, instalada sobre roca metamórfica, presenta los mejores niveles de ruido. Por otro lado, HUB presenta los niveles más altos para periodos cortos y PAR para periodos largos.
- 4 Para estaciones de Arco Continental, los niveles son muy variables, pero en general, se encuentran dentro de los límites máximos. El ruido en la banda de microsismos oceánicos es relativamente menor al de las estaciones de Ante-arco. La estación CUS es la que mejores niveles presenta a lo largo de todo el espectro. Por otro lado, CHVY y YLS son las que muestran los niveles más elevados para periodos corto y periodos largos, respectivamente.
- 5 Para estaciones de Tras-arco, las estaciones YRM, PUC e ITQ son las que mayores niveles y variabilidad de ruido sísmico de periodo corto presentan, llegando a superar siempre durante hora diurnas el límite máximo. Para periodos largos los niveles son aceptables, siendo YRM la que mayores niveles presenta. Para la banda de microsismos oceánicos, los menores niveles observados están en IQT ya que es la que más dista del Océano Pacífico.
- 6 Se ha definido la correlación entre la variación diurna del ruido sísmico de periodo corto (< 2 s) y la presencia de actividad antrópica (i.e. ciudades, centros mineros, vías rápidas) en las cercanías de la estación. Esta correlación es aún más fuerte en el caso de estaciones instaladas en suelos poco competentes.

- 7 Se ha definido la influencia de los factores ambientales sobre la variación de los niveles de ruido de periodo largo (> 20 s) en las componente horizontales, sobre todo en estaciones que no están correctamente aisladas de las variables meteorológicas (i.e. temperatura, presión atmosférica y flujos de vientos dentro de la caseta).
- 8 Para la banda de microsismos secundarios (4-10 s), el cambio estacional de verano a invierno implica un alargamiento del pico de periodo dominante (de 4-5 s hacia 7-9 s). Esta variación es explicada por el aumento de tormentas en el Pacífico Sur durante el invierno austral.
- 9 Para la banda de microsismos primarios (10-20 s), los niveles son predominantes en el verano. Es probable que la longitud de onda de las olas de mar que los generan decrezca durante el invierno, produciendo ruido de menor periodo, el que se añade al pico de microsismos secundarios. Además, no se detecta un fuerte decrecimiento de sus niveles con respecto a la distancia de separación con las costas del Pacífico.

BIBLIOGRAFÍA

- Algue J. (1900).** *"Relation entre quelques mouvements microseismiques et l'existence, la position et la distance des cyclones"* En: Proces-Verbaux et memoires du congres international de meteorologie, pp. 131.
- Ardhuin F., Stutzmann E., Schimmel M. y Mangeney A (2011).** *"Ocean waves sources of seismic noise"*. En: Journal of Geophysical Research, vol. 116, C09004.
- Asociación LAGESA_CFGS (1997).** *"Geología de los Cuadrangulos de Satipo y Puerto Prado"*. En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 86.
- Beauduin R., Lognonné, Montagner J.P., Cacho S., Karczewski J. F. y Morand M. (1996).** *"The Effects of the Atmospheric Pressure Changes on Seismic Signals or How to Improve the Quality of a Station"*. En Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 86, n° 6, pp. 1760-1769.
- Beer M., Kougioumtzoglou I., Patelli E. y Siu-Kui Au I. (2015).** *Encyclopedia of Earthquake Engineering.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bendat J. S. y Piersol A. G. (1971).** Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Willey Publishing.
- Berger J. y Davis P. (2004).** *"Ambient Earth Noise: A survey of the Global Seismographic Network"*. En: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 109, issue B11.
- Bormann, P. y Wielandt, E. (2013).** *"Seismic Signals and Noise"*. En: *New Manual of Seismological Observatory Practice 2*, chapter 4.
- Brandmeier M. (2014).** *"A remote sensing and geospatial statistical approach to understanding distribution and evolution of ignimbrites in the Central Andes with a focus on Souther Peru"*.
- Caldas V. (1978).** *"Geología de los Cuadrangulos de San Juan, Acarí y Yauca"*. En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 30.
- Carlotto V., Gil W. Cárdenas J. y Chavez R. (1996).** *"Geología de los Cuadrangulos de Urubamba y Calca"*. En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 65.
- Carter J. A., Barstow N., Pomeroy P. W., Chael E. P. y Leahy P. J. (1991).** *"High-frequency Seismic Noise as a Function of Depth"*. En: Bulletin of Seismological Society of America, vol. 81, n° 4, pp. 1101-1114.
- Chávez A., Salas G., Cuadros J. y Gutiérrez E. (1996).** *"Geología de los Cuadrangulos de Putina y La Rinconada"*. En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 66.

- Cobbing J., Quispesivana L. y Paz M. (1996).** "Geología de los Cuadrangulos de Ambo, Cerro de Pasco y Ondores". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 77.
- Cobbing J. (1973).** "Geología de los Cuadrangulos de Barranca, Ambar, Oyon, Huacho, Huaral y Canta". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 26.
- Bellido B. (1979).** "Geología del Cuadrángulo de Moquegua". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 15.
- Cooley J. W. and Tukey J. W. (1965).** "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series". En: Mathematics of Computation, vol. 19, n° 90, pp. 297-301.
- Cossio A. y Jaén H. (1967).** "Geología de los Cuadrángulos de Puemape, Chocope, Otuzco, Trujillo, Salaverry y Sante". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 17.
- Dávila M. (1988).** "Geología del Cuadrangulo de Caylloma". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 40.
- De La Cruz N., Zedano J. y Zapata A. (1997).** "Geología de los Cuadrángulos de San Roque, Río Callería, San Lucas, Pucallpa, Nuevo Utiquina, Cantagallo y Divisor Yurúa-Ucayali". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 102.
- De La Cruz W. (1995).** "Geología de los Cuadrángulos de Río Santa Agueda, San Ignacio, Aramango". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 57.
- Fernández D. (1993).** "Geología de los Cuadrángulos de Pisco, Guadalupe, Punta Grande, Ica y Cordova". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 47.
- Friedrich A., Krüger F. y Klinge K. (1998).** "Ocean-generated microseismic noise located with the Gräfenberg array." En: Journal of Seismology, vol. 2, issue 1, pp. 47-64.
- García W. (1968).** "Geología de los Cuadrangulos de Mollendo y la Joya". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 19.
- Gebauer A., Steffen H., Kroner C. Y Jahr T (2010).** "Finite element modelling of the atmosphere loading effects on strain, tilt and displacement at multi-sensor stations". En: Geophysical Journal International, vol. 181, pp. 1593-1612.
- Hardt D. (2004).** "Understanding Poles and Zeros". En: Analysis and Design of Feedback Control Systems, Department of Mechanical Engineering, MIT.
- Havskov J. Y Alguacil G. (2002).** *Instrumentation in Earthquake Seismology (Modern Approaches in Geophysics)*. Springer.
- Lay, T., y Wallace, T.C. (1995).** *Modern global seismology*. Academic Press.

- Lehujeur M., Vergne J. y Schmittbuhl J. & Maggi A. (2015).** "Characterization of Ambient Seismic Noise Near a Deep Geothermal Reservoir and Implications for Interferometric Methods: a case of study in Northern Alsace, France". En: Geothermal Energy a SpringerOpen Journal.
- Martinez V., Valdivia F. y Cuyubamba P. (1998).** "Geología de los Cuadrangulos de Aucayacu, Río Santa y Tingo María". En Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 112.
- McNamara D. E. y Buland R. P. (2004).** "Ambient Noise Levels in the Continental United States". En: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 94, n° 4, pp. 1517-1527.
- Meredith J. (1975).** "A Study of Seismic Road Noise". M.S. Tesis, Georgia Institute of Technology.
- Mendivil S. (1965).** "Geología de los Cuadrangulos de Maure y Antajave". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín 10.
- Munk W. H. (1950).** *Origin and Geration of Waves.*
- Murphy A. J. y Savino J. M. (1975).** "A comprehensive study of long-period (20 to 200 seconds) earth noise at the high-gain worldwide seismograph stations". En: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 65, n° 6, pp. 1827-1862.
- Olchauski L. y Dávila M. (1994).** "Geología de los Cuadrangulos de Chuquibamba y Cotahuasi". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 50.
- Palacios M., Caldas V. y Vela V. (1992).** "Geología de los Cuadrangulos de Lima, Lurin, Chancay y Chosica". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 43.
- Peterson, J. (1993).** "Observations and Modeling of Seismic Background Noise". En: U.S. Geol. Surv. Tech, Rept. 93-322, pp. 1-95.
- Riedesel M., Moore R. y Orcutt J. (1990).** "Limits of Sensitivity of Inertial Seismometers with Velocity Transducers and Electronic Amplifiers". En: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 80, n° 6, pp. 1725-1752.
- Sanchez F. et al (1999).** "Geología de los Cuadrangulos de Puerto Arturo, Flor de Agosto, San Antonio del Estrecho, Nuevo Perú, San Felipe, Río Algodón, Quebrada Airambo, Mazán, Francisoc de Orellana, Huanta, Iquitos, Río Maniti, Yanashi, Tamshiyacu, Río Tamshiyacu, Buenjardín, Ramón Castilla, Río Yavarí-Mirín y Buena Vista". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 132.
- Sánchez Y., Alvarez C., Lagos M. y Huamán N. (1997).** "Geología de los Cuadrángulos de Balsapuerto y Yurimaguas". En: Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 103.

- Savino J., McCamy K. y Hade G. (1972).** "Structures in earth noise beyond twenty seconds-a window for earthquakes". En: *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 62, n° 1 141-176.
- Sleeman R., Wettum A. y Trampert J. (2006).** "Three-Channel Correlation Analysis: A New Technique to Measure Instrumental Noise of Digitizers and Seismic Sensors". En: *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, n° 1, pp. 258-271.
- Sorrells G. G. (1971).** "A Preliminary Investigation into the Relationship between Long-Period Seismic Noise and Local Fluctuations in the Atmospheric Pressure Field". En: *Geophys. J. R. astr. Soc.*, vol. 26, pp. 71-82.
- Sorrells G.G., McDonald J. A., Der Z. A. y Herrin E. (1971).** "Earth Motion Caused by Local Atmospheric Pressure Changes". En: *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 26, issue 1-4, pp. 83-98.
- Stutzmann E., Roult G. y Astiz L. (2000).** "GEOSCOPE Station Noise Levels". En: *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 90, issue 3, pp. 690-701.
- Wieland E. (2011).** "Seismic Sensors and their Calibration". En: *New Manual of Seismological Observatory Practice 2*, chapter 5.
- Willmore P. L. (1979).** *Manual of Seismological Observatory Practice*. World Data Center A for Solid Earth Geophysics.
- Wilson J. y Reyes L. (1964).** "Geología del Cuadrangulo de Pataz". En: *Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 9*.
- Wilson J., Reyes L. Y Garayar J. (1995).** "Geología de los Cuadrangulos de Pallasca , Tayabamba, Corongo, Pomabamba, Carhuaz y Huari". En: *Carta Geológica Nacional, Serie A, Boletín n° 60*.
- Young C. J., Chael E. P., Withers M. y Aster R. C. (1996).** "A Comparison of the High-Frequency (> 1 Hz) Surface and Subsurface Noise Environment at Three Sites in the United States". En: *Bulletin of Seismological Society of America*, vol. 86, n° 5, pp. 1516-1528.
- Zürn W. y Widmed R. (1995).** "On Noise Reduction in Vertical Seismic Records below 2 mHz using Local Barometric Pressure". En: *Geophysical Research Letters*, vol. 22, n° 24, pp. 3536-3540.