

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE  
AREQUIPA**

**FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA**



**ANÁLISIS DE LOS NIVELES DE RUIDO SÍSMICO  
EN ESTACIONES SÍSMICAS DE BANDA ANCHA DE LA  
RED SÍSMICA NACIONAL DEL PERÚ**

*Tesis presentada por el Bachiller en  
Ciencias Geofísicas:*

**GRACIANO ELARD CUTIPA VARGAS**

*Para optar el Título Profesional de  
INGENIERO GEOFISICO*

*AREQUIPA - PERÚ*

*2006*

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente estudio se realizó con apoyo del INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU (IGP), quien otorgo al autor una beca .y la posibilidad de desarrollarse profesionalmente en el campo de la Geofísica.

Mi agradecimiento al Director de la Dirección de Sismología y Centro Nacional de Datos Geofísicos, Dr. Hernando Tavera por su asesoramiento en la realización del presente estudio y por guiar mi formación, así como por sus críticas, sugerencias y consejos. Asimismo, por brindarme su confianza y amistad.

Al personal del CNDG; Henry Salas, Cesar Jiménez, Consuelo Agüero, Ivonne Pérez-Pacheco, Efraín Fernández, Simeón Rodríguez, Rocío Parillo, Yolanda Zamudio, Héctor Alemán y al Dr. Leonidas Ocola por compartir sus conocimientos y experiencias en sismología, así como por su amistad y calidad humana brindada al autor.

A los Ings. Armando Minaya, Edgar Gonzáles, Roberto Kosaka, Héctor Palza, Jorge Soto, Melecio Lazo y Sebastián Zúñiga por sus enseñanzas y compartir sus experiencias en las aulas de la Universidad.

Un especial agradecimiento a mis padres, Heraclides Vargas y Sixto Cutipa por permitirme tener una formación profesional y por su apoyo incondicional. A mis hermanos y primos, por darme la inspiración de seguir adelante.

A mis amigos y compañeros del IGP, Adolfo Taco, Geremias Moncca, Isabel Bernal, Sheila Yauri, Eder Carhuaricra, Luz Arredondo, Bilha Herrera, Angelica Cahuari, Guisela Talavera y Fabiola Rosado, por brindarme su amistad y por compartir información académica durante el periodo de permanencia en el IGP; finalmente a todas aquellas personas que de alguna manera ayudaron en mi formación profesional.

## ÍNDICE

	Pág.
ÍNDICE	ii
RESUMEN	vi
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	
1.1. Área de Estudio	4
1.2. Objetivos	4
CAPÍTULO II. INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA	
2.1 Sismógrafos Analógicos	5
2.1.1 La Fuerza de Inercia	6
2.1.1 El Resorte	6
2.1.1 El Amortiguamiento	6
2.2 Sismógrafos Digitales	8
2.2.1 Función de Respuesta en Frecuencia	11
2.2.2 Función de Transferencia	12
2.2.3 Amplificación Electrónica	14
2.3 Parámetros Característicos de un Sismógrafo	14
2.3.1 El Ancho de Banda	15
2.3.2 El Rango Dinámico	15
2.4 Sismógrafos Digitales de Banda Ancha	16
CAPÍTULO III. REDES SISMICAS	
3.1 Redes Locales	21
3.2 Redes Regionales	22
3.3 Redes Mundiales	22
CAPÍTULO IV. RED SISMICA NACIONAL	
4.1 Tipos de Transmisión de Datos	26
4.1.1 Línea Telefónica desconectada	27
4.1.2 Transmisión por Radio UHF	27
4.1.3 Transmisión de Data por Satélite (VSAT)	27
4.1.3 Transmisión de Data por Internet	27
4.2 Condiciones Generales para la Instalación de Estaciones Sísmicas	27
4.2.1 Infraestructura	27

4.2.2	Búsqueda y Selección de Emplazamientos	28
4.2.3	Condiciones Impuestas por la Instalación	29
4.2.4	Condiciones debidas a Razones Administrativas	31
CAPÍTULO V. EL RUIDO SÍSMICO		
5.1	Naturaleza del Ruido Sísmico	33
5.2	Causas y Naturaleza del Ruido	35
5.2.1	Ruido Cultural	35
5.2.2	Climático y Ruido Geológico	36
5.2.3	Ruido Instrumental	37
5.2.4	Microsismos	38
5.3	Filtrado del Ruido	40
5.4	Relación Señal / Ruido	42
5.5	Variaciones del Ruido debido a Condiciones Locales	43
CAPÍTULO VI. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RUIDO SÍSMICO		
6.1	Caracterización del Ruido Sísmico	48
6.2	Densidad de Potencia Espectral (PSD)	51
6.3	Selección de la Data	52
6.4	Procesamiento de Datos	53
CAPÍTULO VII. APLICACIÓN A LAS ESTACIONES DE BANDA ANCHA DE LA RSN.		
7.1	Estación Sísmica de Pucallpa (PUC)	57
7.1.1	Geología	58
7.1.2	Clima	58
7.1.3	Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico	60
7.1.4	Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico	63
7.1.5	Variación por Componente de Registro	65
7.2	Estación Sísmica de La Yarada (LYA)	66
7.2.1	Geología	66
7.2.2	Clima	67
7.2.3	Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico	69
7.2.4	Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico	72
7.2.5	Variación por Componente de Registro	74

7.3 Estación Sísmica de Huaylas (YLA)	75
7.3.1 Geología	75
7.3.2 Clima	76
7.3.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico	76
7.3.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico	80
7.3.5 Variación por Componente de Registro	82
7.4 Estación Sísmica de Toquepala (TOQ).	83
7.4.1 Geología	83
7.4.2 Clima	84
7.4.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico	84
7.4.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico	86
7.4.5 Variación por Componente de Registro	90
7.5 Estación Sísmica de Huancayo (HUA)	91
7.5.1 Geología	91
7.5.2 Clima	92
7.5.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico	92
7.5.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico	94
7.5.5 Variación por Componente de Registro	98
7.6 Estación Sísmica de Cajamarca (CAJ)	99
7.6.1 Geología	99
7.6.2 Clima	100
7.6.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico	100
7.6.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico	102
7.6.5 Variación por Componente de Registro	106
7.7 Estación Sísmica de Chachapoyas (CHA)	107
7.7.1 Geología	107
7.7.2 Clima	108
7.7.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico	110
7.7.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico	110
7.7.5 Variación por Componente de Registro	114
7.8 Estación Sísmica de Cusco (CUS)	115
7.8.1 Geología	115
7.8.2 Clima	116
7.8.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico	116
7.8.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico	118
7.8.5 Variación por Componente de Registro	122

7.9 Estación Sísmica de Cotahuasi (CTH)	123
7.9.1 Geología	123
7.9.2 Clima	124
7.9.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico	124
7.9.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico	126
7.9.5 Variación por Componente de Registro	130
7.10 Comparación de todas las Estaciones de la R.S.N.	131
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES	133
BIBLIOGRAFIA	135
ANEXOS: TRABAJOS REALIZADOS	139
- El ruido Sísmico de Fondo. <i>Compendio de trabajos de investigación realizado por estudiantes durante el año 2005, Volumen 7, 89-100.</i>	
- Análisis de los niveles de ruido en estaciones sísmicas de banda ancha de la red Sísmica Nacional. <i>Artículo enviado para su publicación al Boletín de la Sociedad Geológica del Perú (Junio 2006).</i>	
- Análisis de los niveles de ruido en estaciones sísmicas de banda ancha de la red Sísmica Nacional. <i>XIII Congreso Peruano de Geología (Octubre 2006)</i>	
- <i>Diseño y reestructuración de la Pagina Web del CNDG ( Centro Nacional de Datos Geofísicos) <a href="http://khatati.igp.gob.pe/cns/">http://khatati.igp.gob.pe/cns/</a></i>	

## RESUMEN

Se ha estudiado y analizado los niveles de ruido sísmico presente en los registros de 9 estaciones sísmicas de Banda Ancha de la Red Sísmica Nacional (RSN) a cargo del Instituto Geofísico del Perú (IGP) que vienen funcionando desde 1996. La calidad de los registros han sido analizados dentro del rango de frecuencias de 0.01 a 10 Hz. Las curvas de Densidad de Potencia Espectral (PSD) han representado ser una herramienta útil para evaluar la calidad de la señal sísmica e identificar las frecuencias en las cuales predominan los diferentes tipos de ruidos.

La calidad de los registros sísmicos van ha depender fundamentalmente del tipo de suelo sobre el cual se encuentra ubicado que el sensor sísmico y de la distancia de la estación sísmica a las principales fuentes de ruido ya sean de tipo natural ó artificial; así mismo, de la ubicación del sensor dentro de pozos túneles o en la superficie del terreno. Los resultados obtenidos ha demostrado que dentro el rango de frecuencias entre (1 y 10 Hz.) el incremento en las amplitudes del nivel de ruido están relacionados con la presencia de los ruidos de alta frecuencia producido por la actividad diaria del hombre (ruido cultural), lluvia, viento y el tipo de suelo sobre el cual se encuentra ubicado el sensor sísmico. Las estaciones sísmicas que presentan mayores amplitudes en este rango de frecuencias son PUC, CTH y CAJ ya que estas se encuentran sobre suelos poco consolidados y cerca de fuentes de ruido cultural (centros poblados y carreteras). Sin embargo, para el rango de frecuencias entre (0.1 a 1 Hz.) el ruido esta relacionado con las ondas oceánicas producidas por el fuerte oleaje en el interior del océano, la mayoría de las estaciones sísmicas de Banda Ancha en este rango de frecuencias presentan bajos niveles de ruido y cercanas a la curva de mínimo valor establecida por Peterson (1993). Esto se debería posiblemente a que las estaciones se encuentran en continente y alejadas de esta fuente de ruido natural.

En las bajas frecuencias entre (0.01 a 0.1 Hz.) todas las estaciones presentan altos valores de amplitud de los niveles de ruido, siendo las componentes horizontales (N y E) las que presentan mayores amplitudes que la componente vertical (Z), en general en este rango de frecuencias el ruido estaría asociado a las fluctuaciones locales de la presión atmosférica y debido a que los sensores se encuentra ubicados muy cerca de la superficie del terreno.

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

La actual Red Sísmica Nacional Perú (RSN) tiene por objetivo monitorear la ocurrencia de sismos en el territorio peruano y para tal fin, esta compuesta por estaciones sísmicas de periodo corto y banda ancha. Estas últimas fueron instaladas a partir del año 1996 y a la fecha se cuenta con 15 estaciones. Con dicha Red, se provee de información uniforme para la localización rápida de los sismos sensibles y para los estudios detallados de las áreas potencialmente sísmicas.

En general, el procedimiento seguido para la instalación de estaciones sísmicas considera como punto de partida que el sensor se encuentre en suelo rocoso y así, reducir los niveles de ruido natural y artificial, lo cual casi siempre es imposible de lograrse en razón de que es necesario considerar otros factores como la seguridad, transmisión de la data y el acceso rápido a la estación sísmica. En razón a esto, no todas las estaciones de banda ancha de la RSN fueron instaladas en roca; por lo tanto, se hace necesario conocer los niveles de ruido existente en cada emplazamiento a fin de poder cuantificar la calidad de señal que se registra. Debe tenerse en cuenta que la utilidad de los datos sísmicos se ve grandemente incrementada cuando los niveles de ruido son reducidos. Una buena cuantificación y entendimiento del ruido sísmico es el primer paso para reducir los niveles de ruido en los datos sísmicos (Stutzmann, 2000).

Estudios sobre los niveles de ruido sísmico han sido hechos para las redes sísmicas mundiales como la USGS (Peterson, 1993) y GEOSCOPE (Stutzmann et al, 2000), nacionales como la de Alemania (Bormann et al, 1997) y España (Chavarria et al, 2001) aplicando el método de Densidad de Potencia Espectral. En general, estos autores asocian la presencia del ruido de fondo en los registros sísmicos a los producidos artificialmente (actividad diaria del hombre, explosiones, etc.) y a los producidos en forma natural (oscilaciones del mar, fluctuaciones barométricas y temperatura, viento, geológico, etc.). Los resultados obtenidos en estos estudios han permitido obtener una cierta dirección en el diseño de las redes y en el emplazamiento de las estaciones, procedimientos que en conjunto han facilitado la localización de los sismos haciendo uso de información de buena calidad.

En el caso del Perú, su compleja geomorfología con la presencia de la Cordillera Andina es base fundamental en la caracterización de las principales fuentes de ruido que afectan a la calidad de la información sísmica que registra la Red Sísmica Nacional (RSN). Dicha geomorfología es el resultado de la ocurrencia continua de sismos con origen en sus dos fuentes sismogénicas: el denominado proceso de subducción de la Placa de Nazca (Oceánica) bajo la Sudamericana (Continental) que genera frecuentemente sismos de magnitud elevada y los sismos producidos por las deformaciones corticales, presentes a lo largo de la Cordillera Andina, con sismos menores en magnitud y frecuencia. Las características de la distribución espacial de la actividad sísmica pueden ser analizadas en la Figura 1.1, periodo 1960 – 2005 ( $m_b > 5$ ).

Para el monitoreo de esta sismicidad, el Instituto Geofísico del Perú, cuenta con una red sísmica compuesta por estaciones de Periodo Corto (PC), Banda Ancha (BA) y Acelerómetros (AC) distribuidas alrededor de las principales fuentes sismogénicas definidas por Tavera et al (2001), Bernal y Tavera (2002). Según la Figura 1.1, algunas estaciones se encuentran formando pequeños arreglos con el propósito de obtener información sísmica local y regional de las fallas geológicas activas. En general, todas las estaciones sísmicas han sido instaladas de manera óptima y sin embargo, para muchas de ellas no se han realizado evaluaciones de sus niveles de ruido; por lo tanto, en este estudio se pretende analizar y establecer una metodología para evaluar los niveles de ruido presente en todas las estaciones de banda ancha que integran la RSN hasta el año 2005.

El presente estudio ha sido dividido en ocho Capítulos que en secuencia permiten lograr los objetivos propuestos. El Capítulo I, está dedicado a la introducción y los objetivos del presente estudio. En el Capítulo II, se presenta una descripción general sobre la instrumentación sísmica y las principales bases del mecanismo de los sismógrafos; mientras que, en el Capítulo III se discuten los principales tipos de redes sísmicas y su mecanismo de funcionamiento. En el Capítulo IV se describe las características de la Red Sísmica Nacional (RSN) y en el Capítulo V, se conceptualiza el ruido sísmico, además se discute sus características y rangos de frecuencias predominantes a ser utilizados para su clasificación. En el Capítulo VI

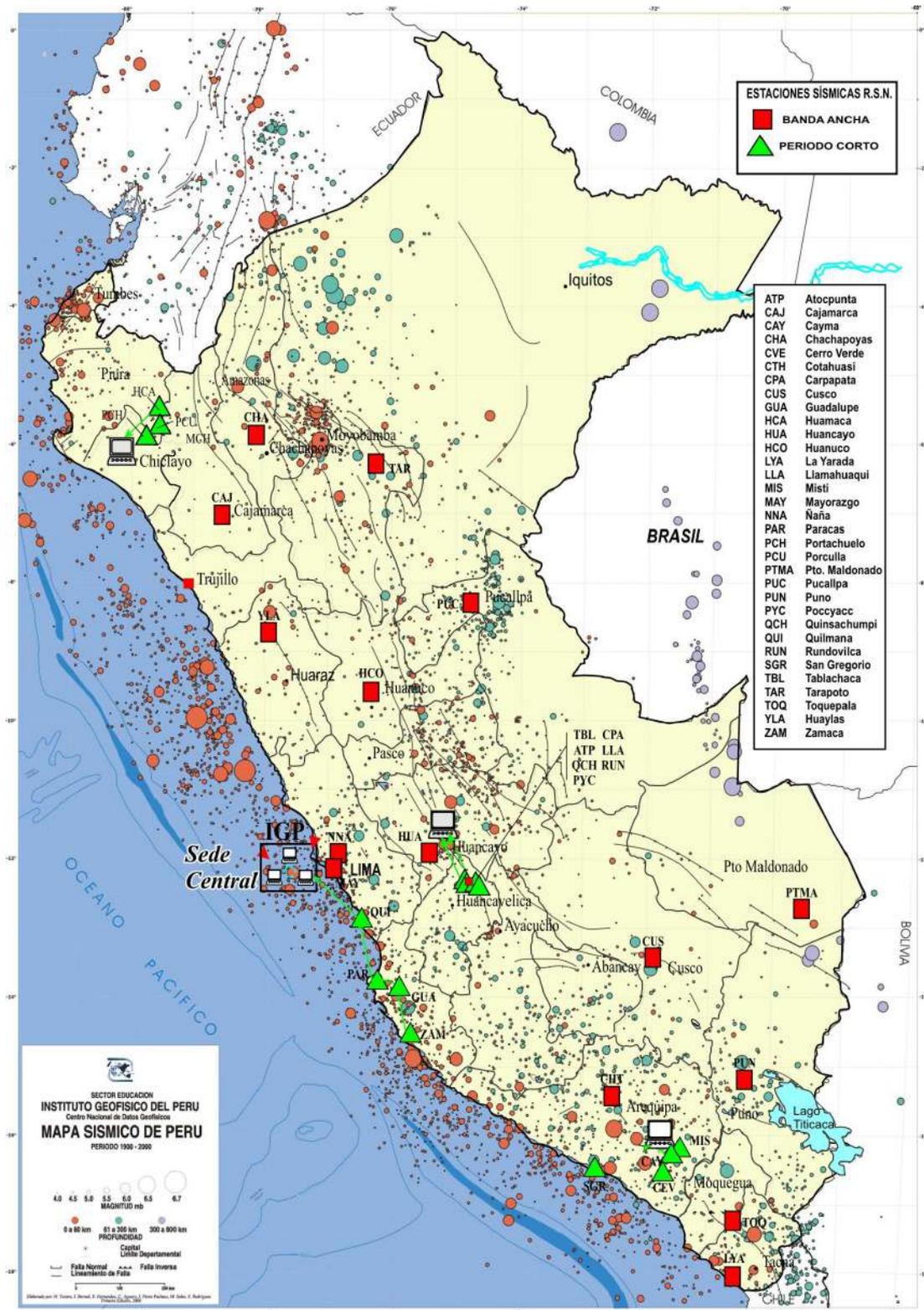


Figura 1.1 Mapa de sismicidad ocurrida en el Perú entre 1960 – 2005 elaborado por el Centro Nacional de Datos Geofísicos del Instituto Geofísico del Perú (CNDG – IGP). El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de los sismos. Los círculos rojos representan a sismos con foco superficial, círculos verdes a sismos con foco intermedio y círculos grises a sismos con foco profundo. Las estaciones sísmicas representadas por cuadrados (Banda Ancha) y triángulos (Periodo Corto) se encuentran ubicadas alrededor de las principales fuentes sismogénicas. Los símbolos de PC indican los centros de recepción de datos, Local y Nacional (Sede Central).

se discute sobre la metodología y el procedimiento utilizado para evaluar el nivel de ruido presente en las estaciones de banda ancha de la RSN. En el Capítulo VII se realiza la discusión e interpretación de los resultados obtenidos y finalmente, en el Capítulo VIII se presenta las conclusiones a las que se han llegado en este estudio, además de algunas recomendaciones. En los anexos, se presenta copia de los diferentes trabajos de investigación en los cuales el autor ha participado durante el desarrollo del presente estudio.

## **1.1 Área de Estudio**

En este estudio se evalúa y analiza los niveles de ruido presentes en las estaciones sísmicas de banda ancha que pertenecen a la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú; las mismas que se encuentran distribuidas estratégicamente alrededor de las principales zonas sismogénicas presentes en el territorio peruano; por lo tanto, el área de estudio abarca todo el Perú.

## **1.2. Objetivos**

Dentro de los principales objetivos propuestos para el presente estudio se tiene:

- 1.1.- Elaborar un procedimiento óptimo y práctico para la evaluación de los niveles de ruido de fondo presentes en la información proveniente de una estación sísmica de Banda Ancha.
- 1.2.- Aplicar el método desarrollado en el ítem 1.1 a las estaciones de Banda Ancha pertenecientes a la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú.
- 1.3.- Analizar y Evaluar la presencia del ruido sísmico en nueve estaciones sísmicas de Banda Ancha de la RSN operativas al año 2005.
- 1.4.- Identificar las frecuencias que caracterizan al ruido y asociarlos a posibles fuentes de origen natural o artificial.
- 1.5.- Obtener el título de Ingeniero Geofísico.

## CAPITULO II

### INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

#### 2.1 Sismógrafos Analógicos

Para comprender como las señales sísmicas son alteradas por un sismómetro y como la señal de salida se relaciona con el movimiento real de la tierra (movimiento de la masa con respecto a la caja externa), se describe las características de un sismómetro como un sistema lineal, invariante en el tiempo. En tal sentido se debe considerar un simple sismómetro vertical pendular, tal como el esquematizado en la Figura 2.1. Este sismómetro consiste en una masa, un resorte y un mecanismo de amortiguamiento representado por la caja sombreada. La masa esta conectada dentro de una caja rígida por medio de un resorte y un mecanismo de amortiguamiento; mientras que, la caja exterior esta fijada al terreno. Se puede escribir el movimiento del terreno con relación a la caja externa por la coordenada  $x$ , siendo  $x_r(t)$ ,  $x'(t)$  y  $x''(t)$  su ubicación, la velocidad y/o aceleración de la masa respecto al sistema inercial será denotada por  $u_m(t)$ . Los movimientos de la masa son el resultado de la suma de todas las fuerzas actuantes sobre ellas es decir, la fuerza inercial, el resorte y el sistema de amortiguamiento Scherbaum (1996).

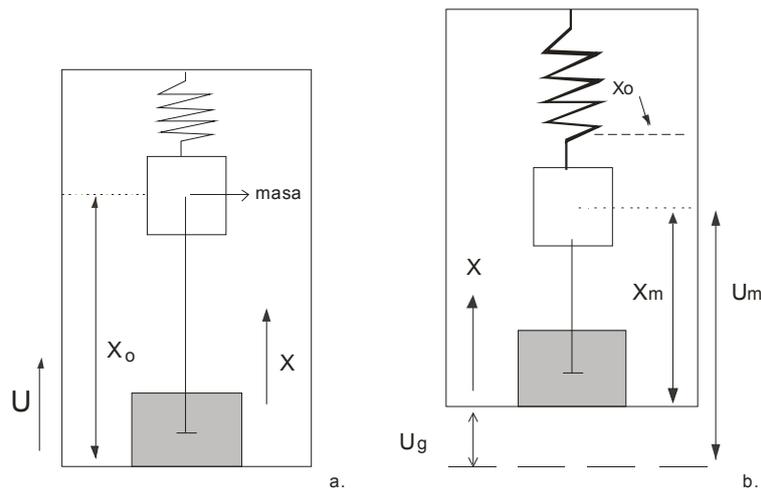


Figura 2.1. Esquema de un sismómetro pendular vertical. El sistema de coordenadas inercial se denota por  $U$ ; mientras que,  $X$  es la coordenada del sistema que se mueve con la caja rígida.

**2.1.1 La Fuerza de Inercia:** La intensidad de la fuerza inercial  $f_i$  es proporcional a la aceleración de la masa  $m$  y esta dirigida en la dirección opuesta al movimiento con respecto al sistema inercial de referencia denotado como "U" y esta fuerza se define como:

$$f_i = - m \cdot U_m(t) \quad (2.1)$$

**2.1.2 El Resorte:** Una segunda fuerza,  $f_{res}$ , es ejercida por el resorte, cuando la masa se mueve de su posición de equilibrio  $x_o$ . La fuerza  $f_{res}$  es proporcional a la distancia con respecto a su posición de equilibrio  $x_r = x_m - x_o$ , medidas en el interior de la caja rígida a cuya base se fija la coordenada X. Puesto que  $f_{res}$  es una fuerza restauradora, tiene signo opuesto al desplazamiento  $x_r$ ,

$$f_{res} = -k \cdot x_r(t) \quad (2.2)$$

donde  $k$  = constante del resorte

**2.1.3 El Amortiguamiento:** Una fuerza de fricción  $f_f$  también actúa sobre la masa y ella es proporcional a la velocidad  $\dot{x}_m(t)$  con la que la masa se mueve. Esta cantidad es descrita en referencia a la coordenada  $x$  que fija al sistema. Como es una fuerza de arrastre, la fuerza de fricción es de dirección opuesta a la dirección de la velocidad,

$$F_f = -D \cdot \dot{x}_m(t) \quad (2.3)$$

donde:

$D$  = coeficiente de fricción u amortiguamiento mecánico equivalente,

En equilibrio todas estas fuerzas suman cero:

$$-m \cdot \ddot{U}_m(t) - D \cdot \dot{x}_m(t) - k \cdot x_r(t) = 0 \quad (2.4)$$

De la Figura 2.1a se deduce que,

$$u_m(t) = u_g(t) + x_m(t),$$

$$-m \cdot (\ddot{U}_g(t) + \ddot{X}_m(t)) - D \cdot \dot{X}_m(t) - k X_r(t) = 0 \quad (2.5)$$

Considerando que entre la masa y su contacto con el extremo del resorte, no hay movimiento relativo, entonces  $\ddot{X}_m(t) = \ddot{X}_r(t)$  y  $\dot{X}_m(t) = \dot{X}_r(t)$ , se puede escribir (ec. 2.5) en términos de  $x_r$ , siendo sus derivadas de  $U_g$ ,

$$m \cdot \ddot{X}_r(t) + D \cdot \dot{X}_r(t) + k X_r(t) = -m \cdot \ddot{U}_g(t) \quad (2.6)$$

la expresión anterior se divide por  $m$ , y se obtiene la ecuación de movimiento del sismómetro,

$$\ddot{X}_r(t) + \frac{D}{m} \cdot \dot{X}_r(t) + \frac{k}{m} X_r(t) = -\ddot{U}_g(t) \quad (2.7)$$

A fin de comprobar que la ecuación del sismómetro es dimensionalmente correcta

se debe comprobar que  $f_{\text{res}} = -k \cdot x_r(t)$  y  $F_r = -D \cdot X_m(t)$ , entonces,

$$\underline{K} = \text{MLT}^{-2} / \text{L} = \text{M T}^{-2} \quad ; \quad \underline{D} = \text{MLT}^{-2} / \text{L T}^{-1} = \text{M T}^{-1}$$

Considerando los términos constantes de la ecuación del sismómetro (2.7) se tiene,

$$\ddot{X}_r(t) + 2 \cdot \varepsilon \cdot \dot{X}_r(t) + \omega_0^2 \cdot X_r(t) = -\ddot{U}_g(t) \quad (2.8)$$

Donde:  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ ,  $2 \cdot \varepsilon = \frac{D}{m} = 2h \omega_0$  y  $h = \frac{\varepsilon}{\omega_0}$  es llamada la constante de amortiguamiento del sismómetro y "ε" es conocido como el factor de amortiguación.

De la ecuación (2.8) se puede deducir algunas características importantes del sismómetro:

Para movimientos rápidos de la masa, su aceleración respecto a la caja rígida  $\ddot{X}_r(t)$  es alta comparada con su velocidad y desplazamiento  $\dot{X}_r(t)$  y  $X_r(t)$ . Se puede aproximar en el límite  $\dot{X}_r(t)$  y  $X_r(t) \approx 0$  y remplazar en la ecuación (2.8). Así,

$\ddot{X}_r \approx -\ddot{U}_g(t)$ , es el transductor de un sismómetro inercial de desplazamiento con acceso a  $X_r(t)$  para inferir el movimiento del terreno. Integrando la última expresión se tiene  $\dot{X}_r \approx -\dot{U}_g(t)$ ; por lo tanto para movimientos rápidos de la masa el sismómetro inercial mide el desplazamiento del terreno.

Para movimientos lentos de la masa (pequeñas aceleraciones y velocidades) los términos en  $\ddot{X}_r$  y en  $\dot{X}_r$  se hacen despreciables y  $X_r$  domina el lado izquierdo de la ecuación (3.8). En el límite aproximado, o sea  $\ddot{X}_r$  y  $\dot{X}_r \approx 0$ , en la ecuación (2.8) intervendrá el término desplazamiento  $X_r(t)$ , siendo su forma:

$\omega_0^2 \cdot X_r(t) \approx -\ddot{U}_g(t)$ , y en este caso, el transductor de desplazamiento del sismómetro inercial mide  $X_r(t) \approx \frac{\varepsilon}{\omega_0^2} \ddot{U}_g(t)$  y por lo tanto, para movimientos lentos

de la masa el sismómetro inercial permite conocer la aceleración del terreno.

Para obtener el verdadero movimiento del terreno se debe calcular una suma del movimiento relativo entre la masa móvil y la caja que la contienen ( $X_r$ ) considerando su primera y segunda derivada ( $\dot{X}_r$  y  $\ddot{X}_r$ ) respectivamente. Se necesita conocer el factor de amortiguamiento “ $\varepsilon$ ”, la constante de amortiguamiento “ $h$ ” y la frecuencia natural del sismómetro “ $\omega_0$ ”, ya que todas constituyen los pesos en la ecuación diferencial.

## 2.2 Sismógrafos Digitales

Los sismómetros puramente mecánicos, tal como el inercial, fueron los primeros usados para registrar con exactitud el movimiento del terreno producido por los sismos. En estos sismómetros, la masa móvil es medida con un voltaje que es proporcional a su velocidad, usando para ello una bobina y un campo magnético.

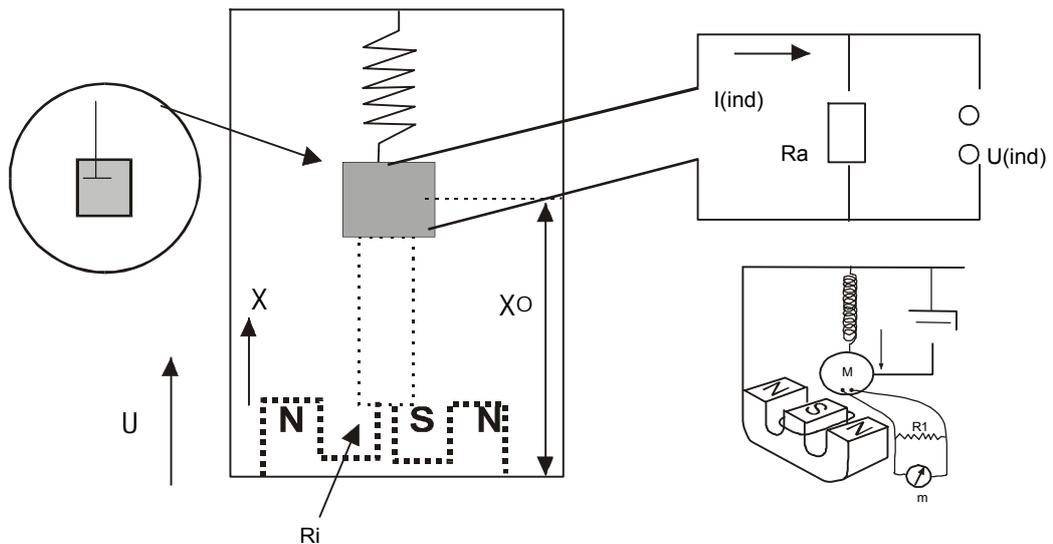


Figura 2.2 Modelo esquemático de un sensor electromagnético.

El sistema incorpora un transductor de velocidad, y se mejora el amortiguamiento electromagnético. Se genera un voltaje  $U_{\text{inducido}}$  en los extremos de la bobina que es proporcional a  $\dot{X}_r(t)$ , (la velocidad de la masa del sismómetro con respecto a la caja rígida). Si la bobina es fijada a una resistencia  $R_a$  y la corriente inducida generada  $I_{\text{inducida}}$ , será:

$$I_{\text{inducida}} = \frac{U_{\text{inducido}}}{R_a + R_{\text{interna}}} \quad (2.9)$$

Aquí  $R_{\text{interna}}$  es la resistencia interna del circuito amortiguador, incluyendo la bobina. El campo magnético inducido estará orientado en un sentido tal que amortigüe el movimiento produciendo el voltaje inducido  $U_{\text{inducido}}$ . El factor de amortiguamiento  $\epsilon_{\text{bobina}}$  debido a la bobina, es proporcional a  $\frac{1}{R_a + R_{\text{interna}}}$ , pues por ejemplo a menor resistencia puente  $R_a$ , habrá más corriente inducida y se generará mayor fuerza electromotriz  $U_{\text{inducido}}$ ; por lo tanto, a mayor campo electromagnético que se oponga al movimiento, habrá mayor amortiguación:

$$\epsilon_{bobina} \propto \frac{1}{R_a + R_{interna}} \quad (2.10)$$

Tomando en cuenta la atenuación mecánica del péndulo ( $\epsilon_o$ ), se obtiene  $h = \epsilon / \omega_o$ ;

$$\epsilon = h \omega_o = \epsilon_o + b \frac{1}{R_a + R_{interna}} \quad (2.11)$$

Para la constante de amortiguamiento  $h$ , (2.11) se convierte en:

$$h = h_o + b' \frac{1}{R_a + R_{interna}} \quad (2.12)$$

Aquí,  $h_o$  describe el amortiguamiento mecánico del péndulo.

Adicional a los elementos mostrados en la Figura 2.2, los sismómetros electromagnéticos tienen una bobina de calibración para imponerle un desplazamiento predefinido a la masa del sismómetro. De este modo encendiendo y apagando la corriente de calibración se genera una función escalón en aceleración equivalente a soltar la masa del sismómetro desde un desplazamiento inicial conocido. La señal de calibración mostrada en la Figura 2.3 es la respuesta de un sensor de velocidad a una función escalón de aceleración.

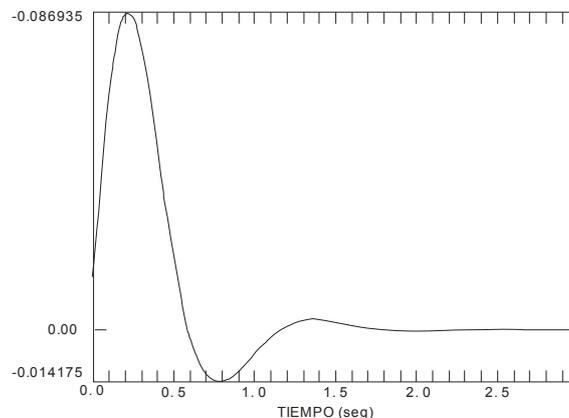


Figura 2.3 Respuesta de un sismómetro electrodinámico a una función escalón en aceleración.

De los 2 primeros picos y del periodo de amortiguamiento de la Figura 2.3 se puede determinar la constante de amortiguamiento  $h$  y la frecuencia natural  $f$  del sistema. De la Figura 2.3 se puede leer que el valor máximo es  $a1 = 0.0869349$  y  $a2 = |-0.014175| = 0.014175$  el valor mínimo. La relación  $a1/a2$  está determinado por un término exponencial, con la cual se estima el valor de la constante de amortiguamiento,

$$a_k / a_{k+1} = e^{-\varepsilon t} / e^{-\varepsilon(t+T/2)} = e^{-(T/2)} \quad (2.13)$$

$$\ln(a_k/a_{k+1}) = \varepsilon T/2$$

$$\ln(0.086935/0.014175) = \varepsilon T/2$$

$$1.837 * 2 = \varepsilon T$$

$$3.6274 = \varepsilon 1.15$$

$$3.1543 = \varepsilon$$

El periodo  $T = 1.15$  seg. se mide en el segundo cruce por el cero de la señal.

$$H = \varepsilon / \omega = \varepsilon / (2\pi 1/T) = 3.1543 / (2 \pi 1/1.15) = 0.5773$$

$$F = 1/T = 1/1.15 = 0.86956 \text{ Hz.}$$

A continuación, se explica las características principales de las funciones en frecuencia, función de transferencia y amplificación electrónica propias del sistema descrito.

**2.2.1 Función de Respuesta en Frecuencia:** Se desea conocer la respuesta del sismómetro a una señal de entrada arbitraria y esta puede ser descrita como una superposición de armónicos (series o integral de Fourier) del tipo,

$$U_g(t) = A i e^{j\omega t} \quad (2.14)$$

La aceleración del terreno correspondiente a dicha señal es:

$$U_g''(t) = -\omega^2 A i e^{j\omega t} \quad (2.15)$$

y la solución de la ecuación del sismómetro,

$$\ddot{X}_r(t) + 2\varepsilon \dot{X}_r(t) + \omega_0^2 \cdot X_r(t) = -\ddot{U}_g(t) \quad (2.16)$$

$$\text{se convierte en } \ddot{X}_r(t) + 2\varepsilon \dot{X}_r(t) + \omega_0^2 \cdot X_r(t) = \omega^2 A i e^{j\omega t} \quad (2.17)$$

Una posible solución a la ecuación anterior esta dada por:

$$X_r(t) = A_o e^{j\omega t}$$

$$X_r^i(t) = j\omega A_o e^{j\omega t}$$

$$X_r^{ii}(t) = -\omega^2 A_o e^{j\omega t}$$

Insertando estas ecuaciones en (2.17), se obtiene

$$-\omega^2 A_o e^{j\omega t} + 2.\varepsilon j \omega A_o e^{j\omega t} + \omega_0^2 A_o e^{j\omega t} = \omega^2 A_i e^{j\omega t}$$

$$-\omega^2 A_o + 2.\varepsilon j \omega A_o + \omega_0^2 A_o = \omega^2 A_i \quad (2.18)$$

Resolviendo para  $A_o / A_i$  se tiene,

$$A_o / A_i = \frac{-\omega^2}{\omega^2 - 2.j.\varepsilon.\omega - \omega_0^2} = T(j\omega) \quad (2.19)$$

$T(j\omega)$  es la función de respuesta en frecuencia del sismómetro.

**2.2.2 Función de Transferencia:** Para obtener una expresión de la función de transferencia, se resuelve la ecuación del sismómetro usando la transformada de Laplace en la ecuación (2.16):

$$\ddot{X}_r(t) + 2.\varepsilon \dot{X}_r(t) + \omega_0^2 \cdot X_r(t) = -\ddot{U}_g(t) \text{ es,}$$

$$s^2 X_r(s) + 2.\varepsilon.s \cdot X_r(s) + \omega_0^2 \cdot X_r(s) = -s^2 U_g(s)$$

y así  $(s^2 + 2.\varepsilon.s) + \omega_0^2 \cdot X_r(s) = -s^2 U_g(s)$

finalmente, la función de transferencia es,

$$T(s) = X_r(s) / U_g(s) = \frac{\text{desplaz.rel.delamasa}}{\text{desplaz.del.suelo}(s)} = \frac{-s^2}{s^2 + 2.\varepsilon.S + \omega_0^2} \quad (2.20)$$

De acuerdo a lo descrito la función respuesta en frecuencia puede ser obtenida de la ecuación de la función de transferencia reemplazando  $s$  por  $j\omega$ .

Como la ecuación cuadrática  $x^2 + b.x + c = 0$  tiene las raíces,

$X_{1,2} = -b/2 \pm \sqrt{b^2/4 - c}$ , se obtiene la posición de los polos (raíces del denominador de la ecuación anterior (14)

$$\begin{aligned} P_{1,2} &= -\varepsilon \pm \sqrt{\varepsilon^2 - \omega_0^2} \\ &= -h\omega_0 \pm \sqrt{h^2 - 1} = -(h \pm \sqrt{h^2 - 1})\omega_0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Para el caso de sub-amortiguado ( $h < 1$ ) la ubicación de los polos, es:

$$P_{1,2} = -(h \pm \sqrt{h^2 - 1})\omega_0 \quad (2.22)$$

La distancia del polo al origen, puede ser resuelto usando Pitágoras:

$$|P_{1,2}| = \sqrt{h^2 + (1 - h^2)}|\omega_0| = |\omega_0| \quad (2.23)$$

Así, los polos de un sismómetro sub-amortiguado están localizados en el lado izquierdo del plano -s a una distancia  $|\omega_0|$  del origen. La cantidad  $h|\omega_0|$  es la distancia a partir del eje imaginario.

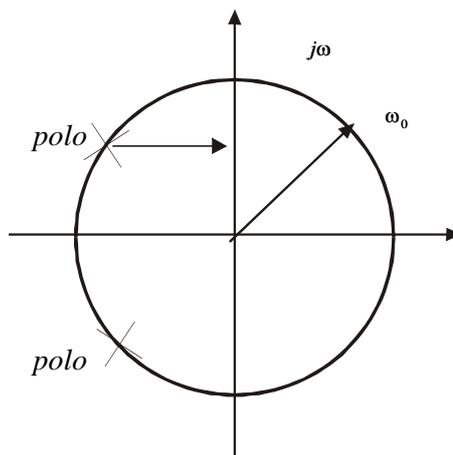


Figura 2.4. Interpretación geométrica de la posición de los polos, la frecuencia  $\omega_0$ , y el factor de amortiguamiento  $h$  para un sismómetro.

**2.2.3 Amplificación Electrónica:** Todos los instrumentos sismológicos que se construyen en la actualidad están basados en un sismómetro (características han sido

ya estudiadas) y un sistema de amplificación electrónica, que sustituye a las de amplificación mecánica o al galvanómetro. Esta forma de amplificación permite alcanzar una sensibilidad superior a la obtenida con los otros sistemas. La amplificación electrónica se logra por amplificadores operacionales y estos consisten en circuitos en los cuales la impedancia de entrada tiene valores típicos de  $10^8 - 10^{12} \Omega$ , y la impedancia de salida del orden  $1 \Omega$ , tal que a una tensión de entrada  $e_e$  corresponde una salida  $e_s$ , relacionadas por la ganancia A en la forma  $e_s = A e_e$ . Udiaz. y Mezcua (1986).

Existen tres formas de configuración para los amplificadores operacionales: lazo abierto, modo inversor y modo no inversor, que se utilizan combinados para obtener la amplificación final del sistema. Además de lograrse ganancias muy superiores a las de los sistemas convencionales, es posible igualmente filtrar la señal de salida mediante la utilización de filtros ya sean activos o pasivos. Por último, las señales amplificadas pueden grabarse en sistemas convencionales de tambor, en forma visible o en cinta magnética analógico o en digital, previo paso por un convertidor analógico-digital. Esto último permite un posterior tratamiento de amplificación, filtro y registro fácilmente realizables. En la actualidad, este sistema está muy generalizado por la conveniencia para disponer de los datos en forma digital para análisis posteriores.

La curva de amplificación electrónica de los distintos tipos de sismógrafos abarca solo una gama más o menos amplia de periodos (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7). Los sistemas muy selectivos tienen un pico estrecho para un periodo determinado, mientras que los llamados de respuesta plana o banda ancha (broad band) tienen la misma amplificación (8) para un rango de periodos muy grande (Figura 2.5.)

### **2.3 Parámetros Característicos de un Sismógrafo**

Tanto los sismógrafos de tipo mecánico como electromagnético y en los modernos de amplificación electrónica, los movimientos del suelo que son capaces de detectar y registrar están relacionados con las características de amplificación y periodo del sismómetro (Udiaz y Mezcua, 1986).

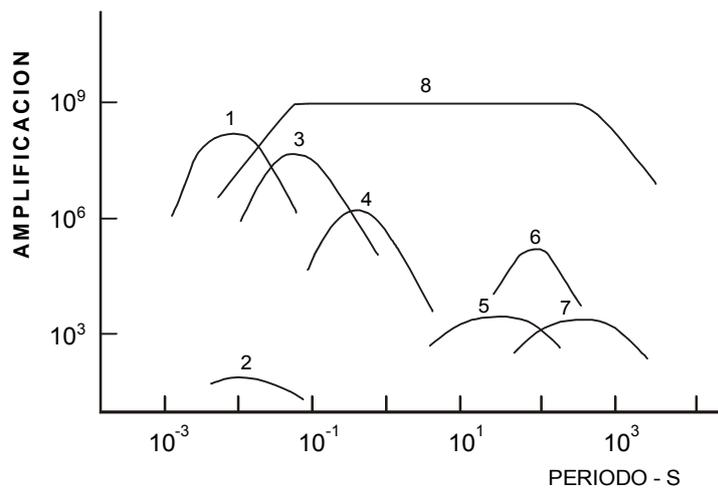


Figura 2.5 Respuesta plana para un sismómetro de banda ancha (Udiaz y Mezcuca, 1986).

**2.3.1 El Ancho de Banda.-** Corresponde al intervalo de frecuencias en el que va a resultar sensible el instrumento sísmico, en los instrumentos de amplificación electrónica existe una gran flexibilidad en la definición de este parámetro, siendo la única limitación aquella que proceda del sistema de registro de la señal, en caso de registro en analógico visible. La razón es que el ruido de fondo de la señal aumenta en el ancho de banda, favoreciendo un enmascaramiento de pequeñas señales que podrían ser visibles en un registro con una anchura de banda inferior.

**2.3.2 El Rango Dinámico.-** Es el intervalo entre la mayor y menor señal que puede registrarse y que se puede expresar como la aceleración de estas dos señales. Este parámetro se suele dar en decibelios ( $1 \text{ decibelio} = 20 \log(A/A_0)$ ), lo que equivale a que un intervalo entre señales de 1000 veces es lo mismo que un rango dinámico de 60 dB. Si consideramos el registro digital del sismógrafo, el rango dinámico depende del número de bits, en una palabra, de datos, mientras que el ancho de banda viene definido por el muestreo de la señal y la respuesta instrumental. De esta forma, si se tiene una selección de la forma de registro y su rango dinámico, podemos especificar la sensibilidad requerida de todo el sistema.

Por ultimo, un sistema formado por un sismómetro y su sistema de registro se caracteriza por su curva de respuesta, la cual contiene toda la información concerniente al comportamiento del sismógrafo ante un movimiento sísmico. La forma usual de representación es la curva de amplificación o magnificación  $M(f)$ , donde  $f$  es

la frecuencia de movimiento y  $A$  es la relación entre la magnitud registrada y la amplitud del movimiento de entrada, por lo que esta representación es una curva de sensibilidad en desplazamiento. Si se desea, se pueden obtener las curvas de sensibilidad en velocidad o aceleración.

$$V(f) = M(f) / 2\pi f \quad \text{o} \quad A(f) = M(f) / (2\pi f)^2 \quad (2.24)$$

#### 2.4 Sismógrafos Digitales de Banda Ancha

Los antiguos sismógrafos mecánicos tienen una curva de respuesta en frecuencias bastante baja, pero su amplificación está limitada por la fricción y por la masa necesaria para superarla. Los sismógrafos electromagnéticos no tienen esta limitación y pueden en teoría, conseguirse amplificaciones muy grandes. Sin embargo su rango dinámico está limitado por las dimensiones de los instrumentos y por el registro analógico gráfico. Como se ha visto en los registros gráficos las amplitudes mínimas detectables visualmente y las dimensiones del papel imponen una limitación a un rango dinámico de aproximadamente 60 decibeles (db). Por otro lado, los microsismos de aproximadamente 6 segundos de periodo, si son amplificados por encima de 1000 veces, intervienen en las señales haciendo los registros inservibles, porque se amplifica el nivel de ruido de la señal de tal manera de que la información sísmica se ve enmascarada y confundida con el ruido (*Udiaz y Mezcuca, 1986*).

La solución clásica fue evitar esta banda de frecuencias, es diseñando instrumentos con curvas de amplificación relativamente estrechas y centradas en los cortos periodos con pico en 1 s y para los largos entre 15 y 100 s. Los primeros muy adecuados para el registro de los terremotos cercanos y los segundos para los muy lejanos. Esta solución de separar los instrumentos en respuestas de cortos y largos periodos estuvieron vigentes hasta mediados de los años setenta. Sin embargo, siempre existió el deseo de poder construir instrumentos con la misma respuesta para un rango muy amplio de periodos, y que incluyera la mayoría de las señales sísmicas, tanto terremotos cercanos como lejanos; es decir, aproximadamente entre 0.1 y 100 000 segundos. A este tipo de instrumento se le denomina sismógrafo de banda ancha (Figura 2.6).

En la Figura 2.6 se muestra los diferentes tipos de sismómetros como son: analógicos de Periodo Corto y Periodo Largo; Digitales de alta frecuencia, baja ganancia (acelerómetros) y de banda ancha, todos relacionados por su ancho de

banda y su rango dinámico. Los instrumentos de Banda Ancha presentan un mayor ancho de banda que los sismómetros analógicos en el se que pueden registrar señales de periodo corto así como de periodo largo, en algunos casos (Sismómetros Very-Broadband) permite registrar hasta periodos de las mareas terrestres; Así mismo, los sismómetros de banda ancha presentan un mayor Rango Dinámico comparado con los sismómetros analógicos, en el que se pueden registrar hasta los niveles mínimos de ruido producido en la tierra. El área de color amarillo representa el rango dinámico y el ancho de banda del sismómetro tipo Guralp -40T utilizado en la Red Sísmica Nacional del Perú y los sismómetros Very-Broadband son utilizados en Redes Sísmicas Mundiales.

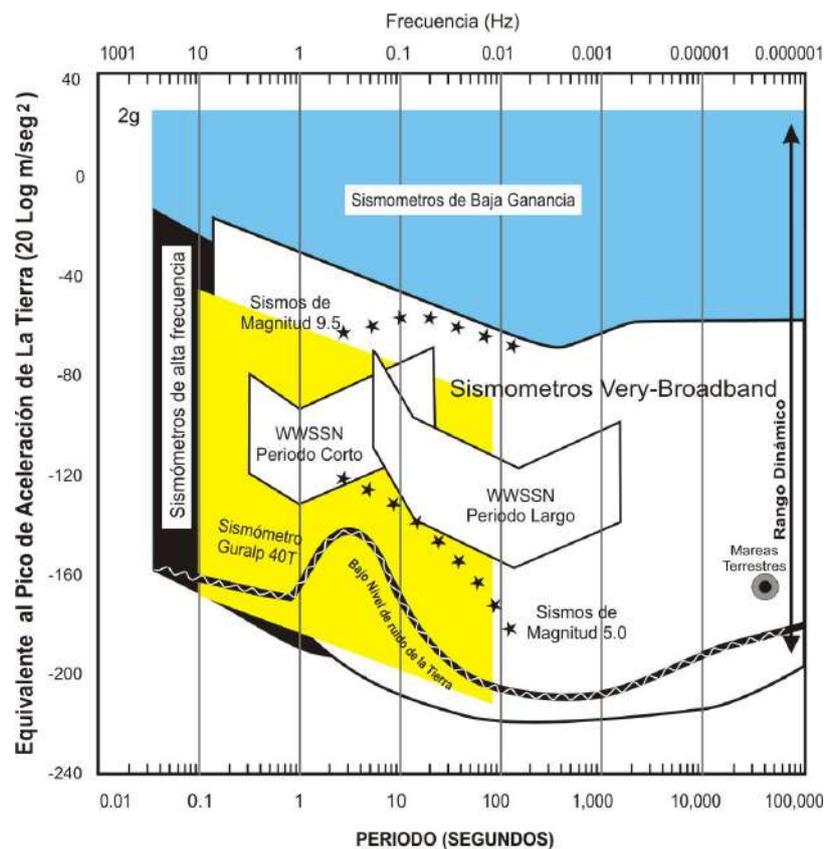


Figura 2.6 Diferentes tipos de sismómetros relacionados por su Ancho de Banda Periodo (Seg) y Rango Dinámico (m/seg\*2) Kennett (2003).

Para registrar en forma digital el voltaje de salida del sismómetro es necesario disponer de un convertidor analógico digital. Hasta muy recientemente sólo se disponía de convertidores de 12 y 16 bits que no son suficientes para cubrir el deseado rango dinámico. Actualmente, con un convertidor analógico digital de 24 bits, se puede cubrir el rango dinámico de 1/100000000. Esto permite que el instrumento solo se sature por un terremoto local  $M > 5$  a 10 Km. de distancia o un telesismo de

M > 9.5 a 30 grados. De esta forma se pueden registrar con un mismo sismógrafo tanto terremotos cercanos como lejanos. La frecuencia de muestreo de la señal suele ser de 20 a 100 Hz. Un problema que plantean los registros digitales es su almacenamiento. Una estación de tres componentes de registro continuo con muestreo de 20 Hz produce unos 100 Mbytes de datos por semana. Actualmente, existen soluciones para almacenar esta cantidad de datos, bien en casetes magnéticos o en discos ópticos.

En general, los sismómetros de banda ancha presentan las siguientes características:

- **Sensor Sísmico (Figura 2.7):**



*Figura 2.7. Sismómetro 40-T Banda Ancha*

SISMOMETRO	: Triaxial Banda Ancha
MARCA	: GURALP
MODELO	: GMG-40T
ANCHO DE BANDA	: 30 seg - 50Hz

***SENSIBILIDAD***

	Velocity Output V/m/s (Differential)	High Gain Velocity Output V/m/s (Differential)
VERTICAL	: 2 x 399	2 x 3999
NORTE-SUR	: 2 x 404	2 x 4042

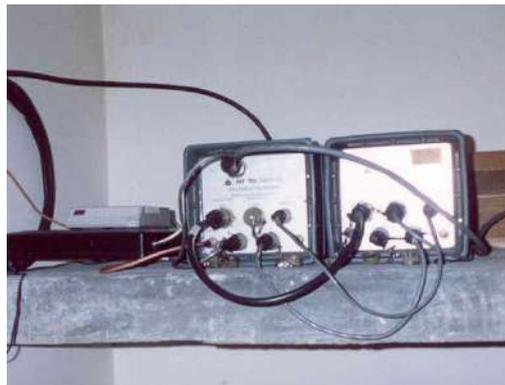
ESTE-OESTE : 2 x 397 2 x 3973

**- Respuesta en Frecuencia**

Frec. Natural : 0.0333 Hz.(30 seg) a 50Hz. (0.02 seg)  
Amortiguamiento : 0.707 crítico

**- Registrador (Figura 2.8):**

MARCA : **REFTEK**  
MODELO : **72A-07** (DAS 24 bits - 3 Canales)  
SERIE N° : 7497 – 7500 – 7663 – 7661 - **7664**  
**(actual)**  
MODULO 114 SERIE N° : **120**  
RANGO DINAMICO : 130dB (50Hz a 150 Hz amp).  
FACTOR DE ESCALA : 1.906 microvoltios/cuenta  
GANANCIA : 0 Db  
FREC. DE MUESTREO : 10,20, 100, 500, 1000 muestras/segundo  
LONGITUD DE REGISTRO : 120 seg  
MODO DE REGISTRO : Continuo, Trigger (LTA/STA)  
FORMATO : PASSCAL



*Figura 2.8 Registrador Reftek 72A-07*

En la Figura 2.9 se muestra un esquema general de los principales componentes que constituyen una estación sísmica de banda ancha. El registrador es

el instrumento que registra y almacena en la memoria las señales sísmicas que son proporcionadas por el sensor sísmico, el tiempo es controlado por un GPS conectado al sistema y así mismo la energía es proporcionada por una batería de 12 V. la que se carga continuamente por medio de paneles solares.

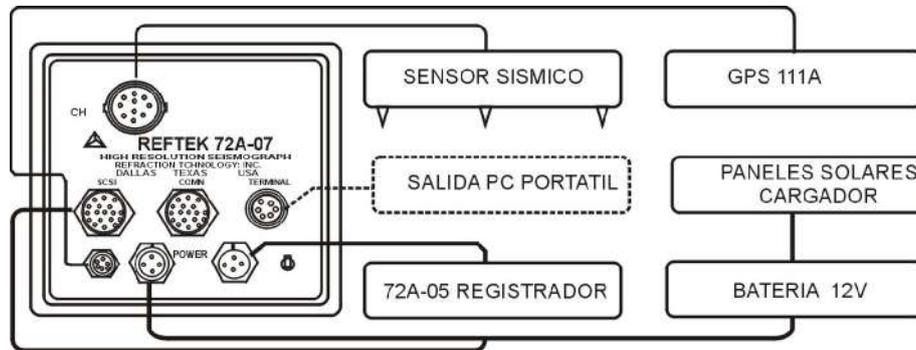


Figura 2.9 Esquema general de las componentes de una estación de banda ancha

## CAPITULO III

### LAS REDES SISMICAS

Para el monitoreo de la sismicidad de una área o región en particular, es necesario contar con un buen número de estaciones sísmicas a fin de tener una buena cobertura azimutal sobre el área de estudio y obtener registros de calidad para la buena localización de los hipocentros de los sismos. En general, una red sísmica está constituida por un conjunto de estaciones que de acuerdo a las dimensiones del área de estudio pueden ser denominadas como red local, regional y mundial.

#### 3.1. Redes Locales

Son aquellas instaladas con la finalidad de obtener información microsísmica de un área de pequeñas dimensiones, y por lo general constan de estaciones sísmicas de periodo corto distribuidas geométricamente sobre el área de interés. Aquí la distancia entre estaciones es muy corta y la transmisión de la data es generalmente directa al centro de adquisición por telemetría. Un ejemplo de red local es la que el Instituto Geofísico del Perú opera en la región norte del Perú. Esta red es conocida como la Red Radiotelemétrica del Norte y tiene como objetivo el monitoreo de la sismicidad local que involucra el área de influencia en la que se ubican las obras importantes como el proyecto especial Olmos Tinajones Depolti y Carhuaquero (Figura 3.1).

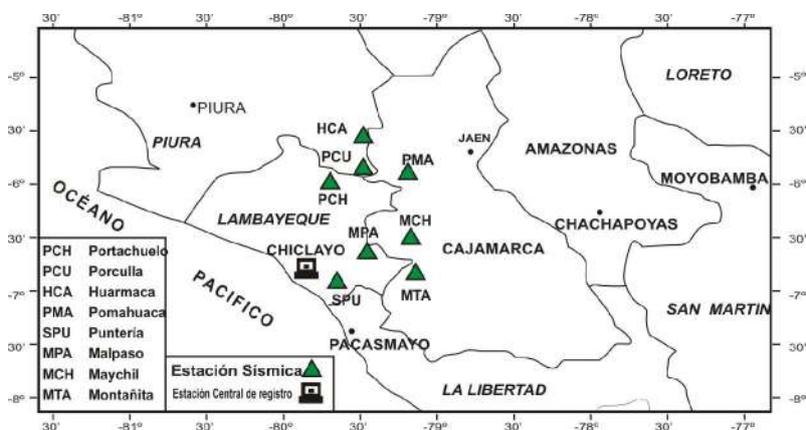


Figura 3.1. Distribución de las estaciones sísmicas de periodo corto (SP) que integran la Red Sísmica Radiotelemétrica del Norte del Perú.

### **3.1.3 Redes Regionales**

La red sísmica regional considera áreas mayores en comparación con las locales; por lo tanto, la distancia entre estaciones es mayor y la transmisión de la data se realiza por telemetría, línea telefónica o satélite. La finalidad de estas redes es principalmente el monitoreo sísmico regional, como parte de los objetivos de las redes sísmicas de cada país.

La Red Sísmica Nacional del Perú a cargo del IGP es de tipo regional (Figura 4.1), siendo la primera estación instalada en 1907 en la ciudad de Lima y posteriormente, en 1931 en Huancayo equipadas con 6 sismómetros (3 de periodo corto y 3 de periodo largo) y en 1962, estaciones similares se instalaron en Naña (Lima) y Arequipa (Tavera, 2001). Estas estaciones fueron integradas a la Red Sísmica Mundial "World Wide Seismological Standard Network". En general, se puede considerar que la Red Sísmica Nacional (RSN) tuvo sus inicios en la década de los 80'. y actualmente consta de 33 estaciones de las cuales 18 son de periodo corto (SP) y 15 son de banda ancha (BB). Las características de estas últimas ya fueron descritas en el capítulo anterior.

### **3.1.4 Redes Mundiales**

A comienzos de los años sesenta, Estados Unidos inicia un programa de implantación de una red mundial de observatorios con características modernas idénticas. El objetivo era usar estaciones sismológicas con instrumentación homogénea, que permitiera obtener amplia cobertura de las principales regiones sísmicas. Esta red se conoce con el nombre de World Wide Standard Station Network o Red mundial de Estaciones Estandar (WWSSN). Inicialmente la red estaba constituida por 125 estaciones, equipadas con sismógrafos electromagnéticos de registro en papel termo sensible de corto y largo periodo. Puede decirse que gran parte de la investigación realizada en la década de los 70's, se debe fundamentalmente a estas redes.

A finales de los años ochenta, la comunidad sismológica puso de manifiesto que las redes, tanto regionales como mundiales, adolecían de una gran antigüedad, en cuanto a tecnología se refiere, señalando una necesidad de actualización de las existentes. De esta forma medio centenar de instituciones de investigación se unieron en una corporación sin ánimo de lucro, denominada Instituto de Investigación para

Sismología (IRIS) cuyo objetivo fundamental fue de instalar una red de cien estaciones digitales de alta ganancia distribuidas por todo el mundo (Figura 3.2). De forma similar, Francia instaló otra red denominada GEOSCOPE; Italia otra para el mediterráneo MEDNET, Alemania la red GEOFON; Japón la red POSEIDÓN y España la red FEBA. Las características de estas redes son similares, puesto que están basadas en sismómetros de banda ancha y registradores Reftek.

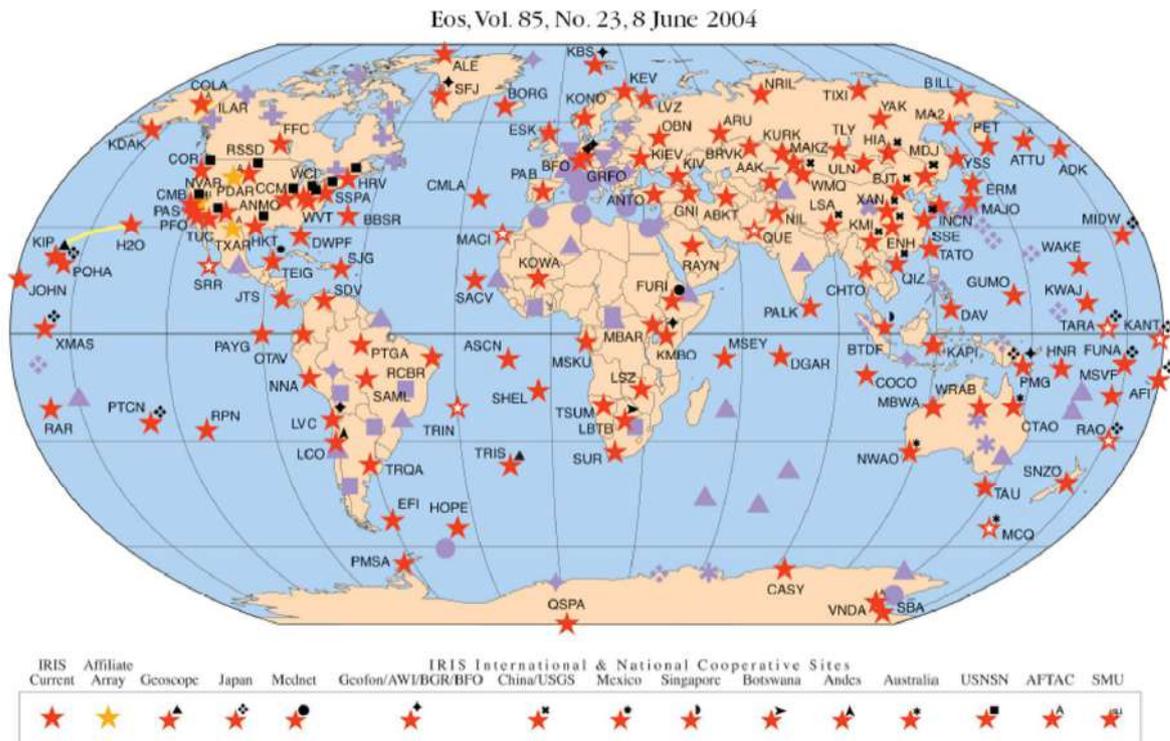


Figura 3.2. Ubicación de las estaciones actuales de la red IRIS (estrellas rojas). En la parte inferior los símbolos caracterizan a cada tipo de red sísmica (Butler, 2004).

En general, de acuerdo al tipo de investigación que se desee realizar, los investigadores disponen de gran diversidad de información que ha permitido un mejor conocimiento de la sismología sobre los procesos de ruptura de grandes sismos y sobre el interior de la tierra y al desarrollo de la sismometría.

## CAPITULO IV

### RED SÍSMICA NACIONAL

La Red Sísmica Nacional a cargo del IGP consta de 33 estaciones distribuidas en casi todo el territorio peruano según se muestra en la Figura 4.1. De estas estaciones, 18 están equipadas con sismómetros de periodo corto (PC) de tres y una componente y las 15 restantes, con sismómetros de banda ancha (BA). Asimismo son parte de la RSN 7 estaciones acelerográficas (AC). En el caso de los sismómetros de PC, las señales sísmicas son tratadas analógicamente y transmitidas por radio en tiempo real a la sede central del Instituto Geofísico del Perú en Lima (IGP) en donde son registrados en formato digital usando un convertidor analógico/digital. La señal de las estaciones de tipo banda ancha es almacenada en las unidades de campo y otras transferidas a la sede central mediante interrogación por línea telefónica.

Los sismómetros PC (Figura 4.2a), son del tipo Kinematics y tienen como frecuencia máxima de registro a 1 Hz (SS-1, L4C y WR1), siendo la magnificación usualmente del orden de  $10E+4$  o  $10E+5$ . Estos sismómetros permiten registrar altas frecuencias, característica de sismos estrictamente locales. Los sismómetros de banda ancha (Figura 4.2b), son del tipo Guralp CMG40-T o Streckeisen 24-bit y tienen rangos de frecuencia entre 0.033 a 50 y 100 Hz. La principal ventaja de estos instrumentos es que presentan una banda grande de frecuencias. Finalmente, los acelerómetros (AC) registran altas frecuencias dependiendo del rango de profundidad en el cual ocurre el sismo (Figura 4.2c). La sensibilidad de estos instrumentos ha sido ajustada a 0.5 y 0.25g.

Actualmente, la transmisión de la data de la RSN se realiza de dos modos (Figura 4.1): por telemetría permitiendo tener los datos en tiempo real mediante un sistema de adquisición ACQ-Sismalp que registra eventos por STA/LTA. Esta información es utilizada para el procesado rápido de sismos sensibles. El sistema de adquisición y procesamiento de datos ACQ-Sismalp, ha sido implementado recientemente con una serie de algoritmos que han permitido brindar mayor rapidez y dinamismo a los procedimientos que se siguen para localizar los sismos. La transmisión de datos por acceso remoto se realiza mediante interrogación por línea telefónica, siendo este procedimiento realizado únicamente cuando el sismo ha sido

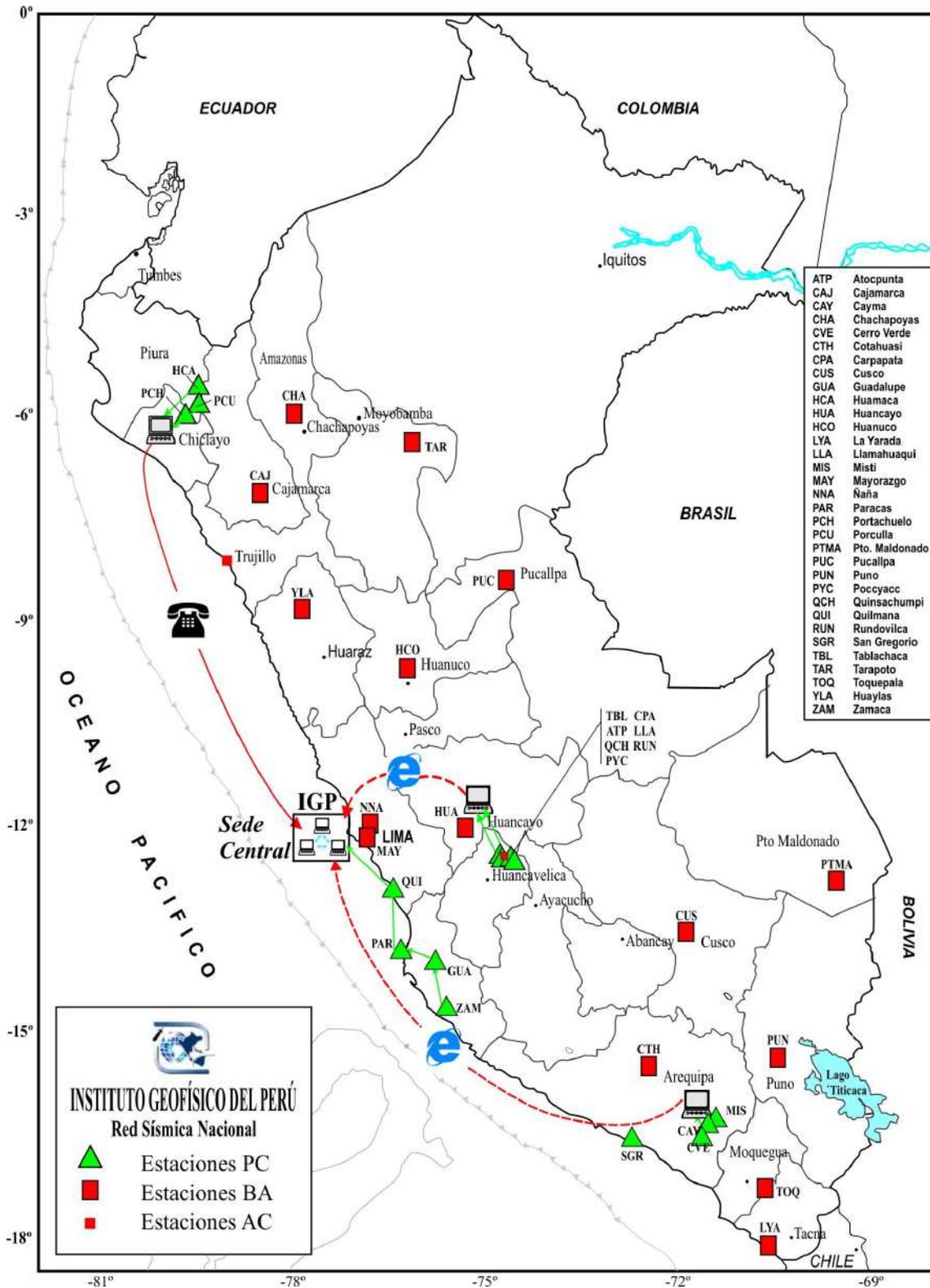
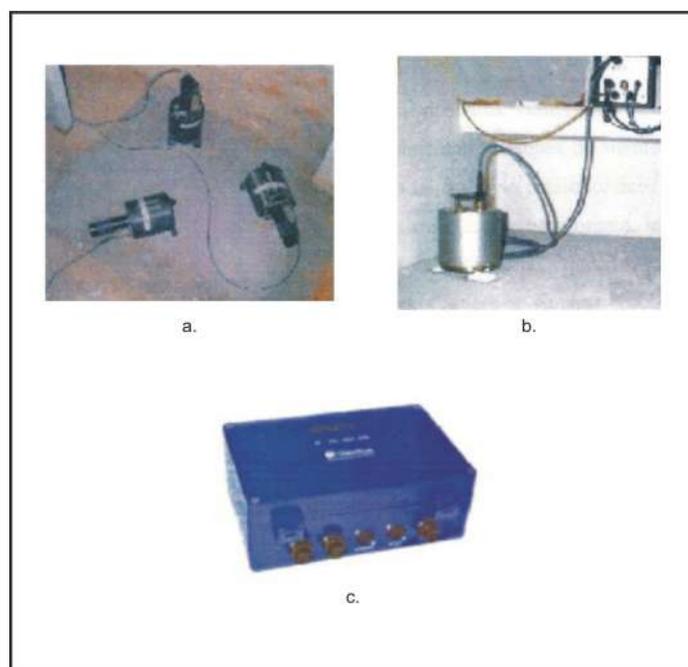


Figura 4.1. Distribución de las estaciones que integran la Red Sísmica Nacional. La transmisión de la Data es como indican las flechas. Las líneas continuas representan la transmisión de la data en tiempo real y las discontinuas, transmisión remota. Los símbolos de pantalla representan los centros de adquisición y los símbolos de teléfono e Internet explorer indican el modo de comunicación con la sede central lima.

sentido al menos con intensidad III en MM. En general, la información sísmica es almacenada en formatos compatibles para su rápido acceso para futuros análisis o trabajos de investigación. Esta información es utilizada en la edición mensual de boletines internos de los sismos sensibles.

De todas las estaciones que integran la RSN, las de CAJ (Cajamarca) y NNA (Lima) con nuevas infraestructuras y sistemas operativos, fueron incorporadas a la red sísmica del CTBTO (Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty). Asimismo, algunas estaciones conforman redes locales para el monitoreo de la actividad microsísmica de algún proyecto como la Red Sísmica telemétrica de Tablachaca (estaciones TBL, ATP, QCH, WAL, QCO, RUN) o las que operan en el volcán Misti temporalmente con 7 estaciones de periodo corto.



*Figura. 4.2. a) Sismómetros de Periodo Corto. b) Banda Ancha  
c) Acelerómetro*

#### **4.1 Tipos de Transmisión de Datos**

La transmisión de los datos sísmicos pueden realizarse por telemetría, satélite, radio o teléfono; sin embargo, el procedimiento que se seleccione dependerá de la disposición económica, de la geomorfología del país y de las necesidades de la información de la data. Las características principales de cada tipo de transmisión de datos pueden ser resumidas como sigue:

#### **4.1.1 Línea Telefónica desconectada**

Consiste en realizar una llamada por teléfono y por interrogación lograr acceso a la base de datos. La ventaja de este procedimiento es que su costo es bajo y la desventaja, que es un medio de transmisión muy lento. -Línea telefónica exclusiva. En este tipo de transmisión el flujo de la data es continuo; es decir, en tiempo real aunque su costo de operación es alto.

#### **4.1.2 Transmisión por Radio UHF**

En este tipo de transmisión el flujo de la data es continuo y en tiempo real. La principal ventaja de este medio es que su costo de operatividad es bajo y su desventaja, es que transmite información a distancias limitadas (<200km).

#### **4.1.3 Transmisión de Data por Satélite (VSAT)**

Este procedimiento tiene como ventaja la no-interferencia en la transmisión de datos y la alta calidad de los mismos, siendo su flujo continuo o en tiempo real. La principal desventaja es que su costo de instalación y operatividad es muy alto.

#### **4.1.4 Transmisión de Data por Internet**

Este es uno de los nuevos métodos de transmisión implementados por el IGP. El sistema procesa en tiempo real en forma digital las señales de la actividad sísmica en forma continua a los centros de adquisición y la información es transmitida por Internet a la sede central a través de los puertos TCP-IP.

### **4.2 Condiciones Generales para la Instalación de Estaciones Sísmicas**

#### **4.2.1 Infraestructura**

La construcción de la Infraestructura en la cual se alberga a una estación influye directamente en la calidad de la señal sísmica; es decir, para minimizar las influencias del ruido sísmico de origen natural y artificial las estaciones sísmicas se deben instalar en el interior de túneles o pozos, sobre roca dura y con aislamiento térmico.

A continuación se detalla los pasos a seguir para la correcta instalación de una estación sísmica.

#### 4.2.2 Búsqueda y Selección de Emplazamientos

Es necesario hacer una preselección de una serie de sitios posibles y escoger entre ellos el emplazamiento más idóneo para la instalación de la estación sísmica. En general, esto exige una gran cantidad de tiempo ya que en la elección definitiva de emplazamientos han de considerarse cuidadosamente cuestiones como las siguientes:

- Lugares remotos y relativamente poco accesibles (*para reducir el nivel de ruido y el vandalismo*), con un acceso por camino de tierra (*a ser posible de paso limitado o de uso exclusivo*) que permita su mantenimiento.
- Las estaciones han de estar alejadas (preferiblemente a distancias > 1.5 km.) de núcleos urbanos y de fuentes de ruido culturales (*industrias, maquinaria, motobombas de riego, generadores de corriente, carreteras, tendidos eléctricos, vías de tren (>3 km.), antenas, canteras, etc.*).
- Las estaciones deben estar situadas en zonas de bajo ruido ambiental (*lejos de árboles, ríos, corrientes de agua subterráneas, escarpes acusados, acantilados, costas, etc.*).
- Ubicadas preferentemente en cuevas, túneles, galerías de minas abandonadas o pozos, a fin de *reducir drásticamente el nivel de ruido y proporcionar estabilidad térmica*.
- Alejadas de campos magnéticos grandes (*tendidos eléctricos, etc.*) para evitar la influencia de campos eléctricos externos en los equipos de adquisición.
- Alejadas de zonas donde puedan caer rayos, para que la estación no se exponga al peligro de los rayos.
- En lugares alejados de la costa (*por la acción del oleaje y las mareas*) o de zonas donde existan fuertes vientos, situaciones ambas que producen niveles altos de ruido.

- Las estaciones deben estar alejadas de zonas de inundación lo cual podría ser perjudicial para la estación y los instrumentos de adquisición.
- La estación debe mantener una buena transmisión de la información ya sea por vía teléfono ó satélite.
- La estación debe contar con seguridad permanente para evitar actos vandálicos.

#### **4.2.3 Condiciones Impuestas por la Instalación**

En la búsqueda y elección definitiva de los posibles emplazamientos de estaciones sísmicas se debe tener en cuenta cuestiones a considerar en la instalación de los elementos esenciales de las mismas, de modo que pueda minimizar las condiciones de ruido ambiental, cultural y artificial en las estaciones de banda ancha, por lo tanto a las condiciones ya descritas se añade las siguientes:

- Los sensores han de instalarse en zonas en el interior de túneles, cuevas o pozos, colocados sobre materiales lo mas compactos posibles; roca dura o materiales medio-duros a fin de disminuir el nivel de ruido.
- El sensor debe de contar con aislamiento térmico y de humedad que hagan estable el comportamiento de los sensores de banda ancha.
- Los sensores deben estar colocados sobre pequeños pilares de hormigón no armado.
- Se deben realizar pruebas de ruido afín de evaluar la calidad de los niveles de ruido que presenta el emplazamiento escogido.
- Las estaciones que transmitan por satélite deben de tener una distancia máxima entre sensor y antena de emisión de unos 100 m. para evitar la influencia de las altas frecuencias al sensor.
- Las antenas de las estaciones VSAT han de estar en lugar alejado de escarpes, en la dirección de la conexión antena-satélite, y no deben existir

obstáculos en un ángulo de 20° alrededor de la dirección antena- satélite, todo ello para tener una perfecta conexión con el satélite.

- El uso de antenas de las estaciones VSAT limita la elección de las ubicaciones debido a la susceptibilidad a la interferencia RF de transmisores de radio de alta potencia y torres de microondas terrestres, debiéndose alejarse al menos 1 Km. de estas fuentes.
- La alimentación, al ser por paneles fotovoltaicos y baterías, en la orientación de los paneles no deben haber obstáculos cercanos que hagan sombra sobre los paneles (lo que disminuiría drásticamente su rendimiento).
- Deben estar en sitios lo menos visibles posibles desde caminos o carreteras frecuentadas y los elementos esenciales de la estación han de estar suficientemente protegidos mediante cercas y otros elementos disuasorios a fin de disminuir las acciones vandálicas.
- Con un acceso por camino de tierra (a ser posible de paso limitado o de uso exclusivo) que permita el mantenimiento de la estación pero que evite el ruido cultural. En su defecto, que pueda habilitarse un camino hasta un sitio cercano a la instalación (*para facilitar así su mantenimiento*).
- En el caso de estaciones con transmisión telefónica, sobre todo para las estaciones de transmisión continua, los emplazamientos no pueden estar muy lejanos de centrales telefónicas (<2 km), *de lo contrario se encarecería excesivamente las instalaciones de enlace*.
- Hay que evitar la instalación de los sensores en zonas inundables, bien por la topografía del túnel, de la insuficiencia del drenaje del sondeo, o por estar el emplazamiento cercano a arroyos, a barrancos, etc., *lo cual dejaría completamente inservible la estación*

Las estaciones de período corto se instalarán con exigencias y características de sitio similares a las anteriores, siempre que esto sea posible. Las condiciones de instalación y aislamiento térmico no son tan estrictas como en el caso de estaciones de banda ancha pero al menos se han de cumplir las siguientes:

- Colocar los sensores a cierta profundidad, retirando el material suelto y colocando los sensores sobre roca dura o zona muy compacta.
- Separarlos de fuentes de ruido culturales y ambientales próximas (ver lo anteriormente expresado).
- Con emplazamientos no muy lejanos de instalaciones telefónicas, para su enlace.

#### **4.2.4 Condiciones debidas a Razones Administrativas**

De otro lado existen razones administrativas que pueden condicionar la búsqueda y elección de los emplazamientos como son:

- Las estaciones deben estar preferiblemente situadas en terrenos públicos a fin de facilitar la tramitación de expedientes y evitar reclamaciones futuras.
- Deben contar con el permiso de los propietarios de los terrenos del emplazamiento de la estación.
- A ser posible, los terrenos donde se ubica la estación, deben tener vigilancia (además de la electrónica, que se controla desde la estación central) o algún tipo de barreras que limiten o condicionen el paso (de modo que se eviten o reduzcan no solo las condiciones de ruido sino también el vandalismo).
- Han de tenerse en cuenta además, una serie de condiciones relacionadas con las características de la obra civil, materiales, logística, etc.

No todas las condiciones impuestas para una óptima instalación de las estaciones sísmicas de banda ancha pueden ser cumplidas. En la instalación de las estaciones de banda ancha de la RSN se ha considerado otros factores primordiales como seguridad, acceso rápido a la estación y comunicaciones, debido a ello no todas las estaciones sísmicas han sido colocadas en roca, en túneles ó alejadas de las fuentes de ruido; por lo tanto, se hace necesario la evaluación y análisis de los niveles de ruido en cada uno de los emplazamientos a fin de discriminar las posibles frecuencias del ruido natural o artificial presentes en los registros sísmicos.

## CAPITULO V

### EL RUIDO SÍSMICO

La interpretación de los registros sísmicos requiere de un buen entendimiento de la generación y propagación de las ondas sísmicas y la influencia de los procesos de registro de cada impulso y su impresión sobre el sismograma. Gracias a los avances de la tecnología en el mejoramiento en la calidad de la instrumentación sísmica ahora es posible obtener una óptima interpretación del movimiento del suelo en forma digital y sobre un amplio rango de frecuencias. El uso de instrumentación de banda ancha requiere una cuidadosa atención a la naturaleza de la componente desorganizada del movimiento sísmico, comúnmente conocido como *ruido* (Kennet, 2001). Esto es debido a la alta sensibilidad de los sismógrafos de banda ancha, que registran en el rango de frecuencias de 0.0333 a 50 Hz. Además de registrar señal sísmica correspondiente a los movimientos del suelo ocasionado por los sismos, se registran otras señales sísmicas del movimiento del suelo y que provienen de otras fuentes tanto naturales como artificiales y que se les denomina *ruido sísmico*.

Tradicionalmente, el ruido sísmico ha sido considerado como algo negativo, molesto y que hay que anularlo o evitarlo para así lograr obtener las señales de los sismos limpias sin interferencias de ruido. En la actualidad, lo que hasta hace pocas décadas era un estorbo en los estudios de propagación y atenuación de ondas sísmicas se ha convertido en una excelente herramienta para caracterizar los efectos locales (geología) y las propiedades dinámicas de las estructuras del lugar de registro. Así como también resultan muy útiles para realizar el control de calidad de las estaciones sísmicas a través de la evaluación y caracterización del nivel de ruido sísmico presente en cada sitio en donde se ubican las estaciones sísmicas.

El ruido sísmico puede definirse como:

- a) Vibraciones en la superficie de la tierra debida a la influencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía.
- b) Una superposición de ondas superficiales que constituyen un campo estacionario y homogéneo, relacionadas con los ruidos de baja frecuencia y de periodo largo.

- c) Ruido ambiental generado por el tráfico vehicular o la actividad humana y están relacionados con los ruidos que presentan altas frecuencias.

### 5.1 Naturaleza del Ruido Sísmico

La superficie de la tierra se encuentra en un constante y leve movimiento que es detectado con sismómetros sensitivos y puede ser ocasionado por efectos locales, tales como las perturbaciones hechas por la actividad diaria del hombre (ruido cultural), las oscilaciones de los árboles por el viento y las vibraciones inducidas por los microsismos generados por las fuertes tormentas oceánicas distantes (ruido natural). Dentro de otro rango de frecuencias el ruido también puede ser generado por efectos regionales tales como la presencia de mareas, la presión atmosférica, los efectos asociados con la variación de la temperatura. La suma de estos tipos de ruidos afecta de manera importante en la calidad de los registros sísmicos. Por lo tanto, cuando se procede a instalar una estación sísmica es importante evitar la influencia de las fuentes de ruido.

Por ejemplo, en la Figura 5.1 se presenta el registro de un sismo de magnitud 3.5 ML en el cual se puede identificar sus fases P y S necesarios para el análisis del evento; sin embargo, si se realiza una ampliación de la señal que procede al sismo, se observa el registro del ruido sísmico.

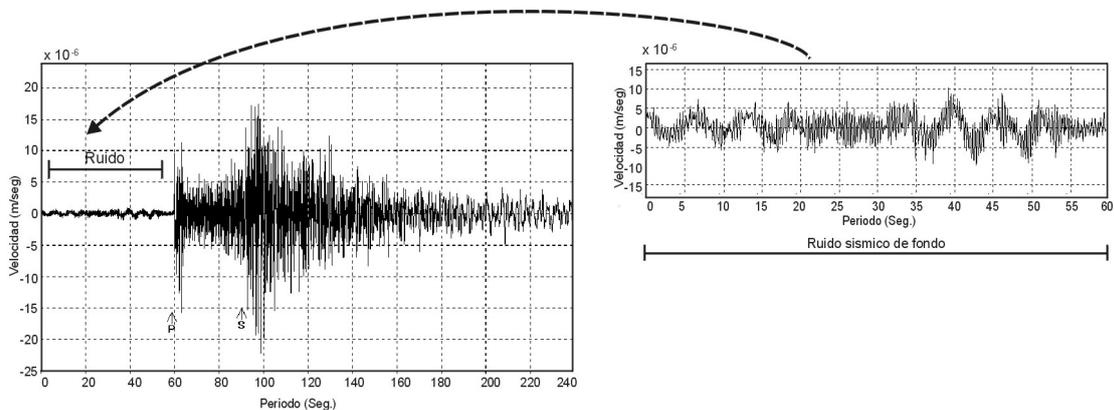
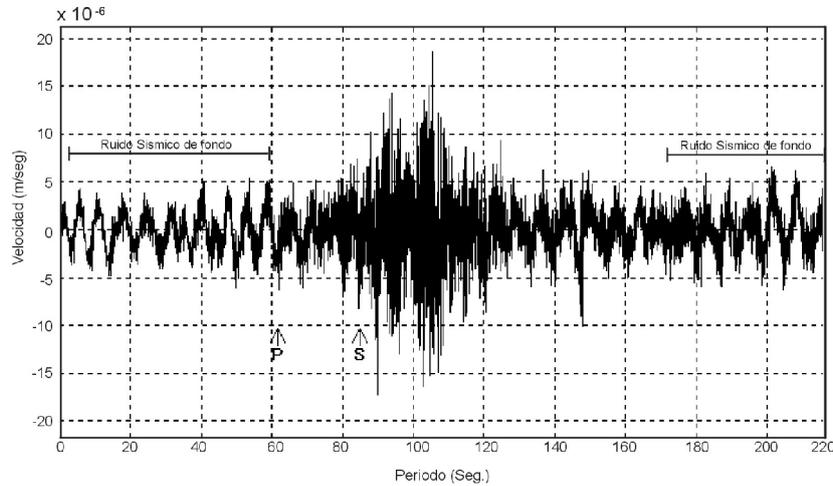


Figura 5.1. Registro de la señal de un sismo local, donde se puede apreciar el ruido sísmico de fondo el cual representa el constante movimiento de la tierra.

El ruido sísmico presente en los registros de una estación sísmica influye en el análisis y procesamiento de los mismos, debido a ello es importante tratar de minimizar sus efectos al momento de realizar la instalación de la estación sísmica; sin embargo, si el nivel de ruido en una estación sísmica es alto por causas ya sean naturales ó artificiales, esto podría producir dificultades en el procesamiento de los

sismos por lo que dificulta identificar claramente sus fases. En la Figura 5.2 se muestra el registro de un evento sísmico en el cual el nivel de ruido es alto y es difícil distinguir la llegada de las principales fases sísmicas.



*Figura 5.2. Señal correspondiente a un sismo de carácter local y con alta influencia del ruido sísmico.*

En general, el ruido sísmico de fondo ocurren en el intervalo de frecuencias de 0.001 a 30 Hz; sin embargo, para realizar su estudio en estaciones de registro banda ancha, es más importante el ancho de banda comprendido entre 0.01 a 10 Hz, ya que en ella la energía sísmica se transmite en forma de ondas sísmicas que son utilizadas para el estudio de los terremotos y para obtener información sobre las características de los parámetros elásticos de la corteza. Las ondas de volumen P y S son usadas para calcular los parámetros hipocentrales de los sismos, estudios de procesos complejos de ruptura, si presentan altas frecuencias, son usadas para el estudio de la estructura de las capas superficiales del suelo. Dentro de este rango de frecuencias se desprende el interés por la sismología.

A la fecha, muchos autores han estudiado y evaluado las características del ruido, así como su origen y rangos de frecuencia predominantes. En la Figura 5.3, se presenta algunos ejemplos de registros de ruido según Payo (1986); a) viento intenso, b) impulso relacionado con una posición incorrecta del sistema de registro c) tráfico y (d, e y f) las llamadas tormentas microsísmicas causadas por borrascas meteorológicas (frente que separa dos masas de aire contiguas a una caliente y otra fría). En este último caso, el periodo parece estar relacionado con la velocidad de desplazamiento del centro de la tormenta oceánica ya que las amplitudes son función de la intensidad de la tormenta oceánica.

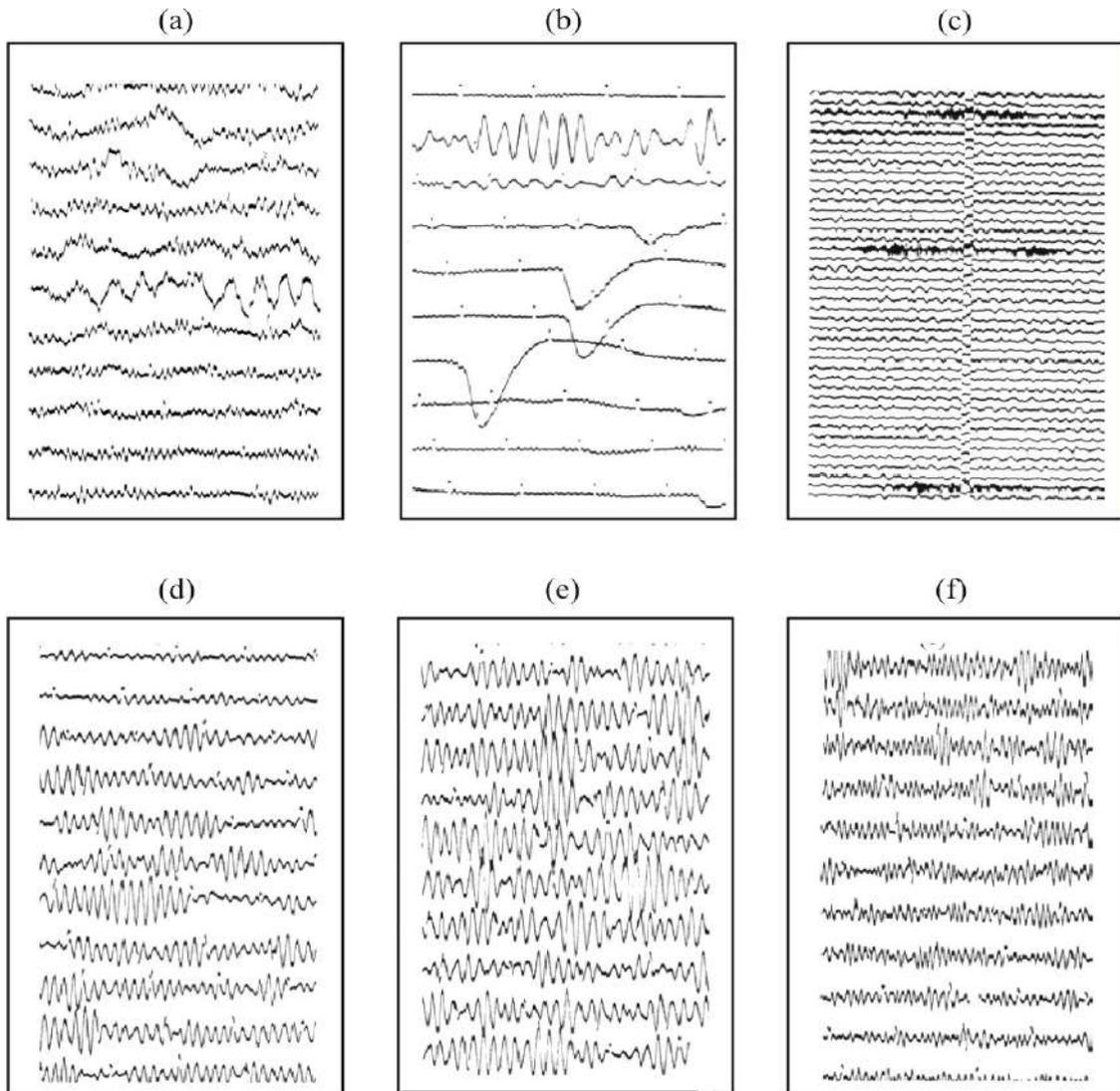


Figura 5.3. Ejemplos de registros de ruido de fondo presente en los sismogramas y son originados por: (a) Viento, (b) Mecánico, (c) Cultural, (d), (e) y (f) Microsismos (Payo, 1986).

## 5.2 Causas y Naturaleza del Ruido

### 5.2.1 Ruido Cultural

La fuente más común del ruido sísmico proviene de actividad del hombre sobre la superficie de la Tierra. Esta fuente es referida como “ruido cultural” y se origina principalmente por el registro de la propagación de las ondas sísmicas que es producida por el paso de vehículos, vibración de maquinarias industriales cercanas a una estación sísmica (Figura 5.4). El ruido cultural se propaga principalmente como ondas superficiales de alta frecuencia (1-10 Hz.) que se atenúan a varios kilómetros de distancia y profundidad. Por esta razón, el ruido cultural se reduce significativamente si

se evalúan en pozos profundos y túneles. Este muestra fuertes variaciones diurnas y tiene frecuencias características que dependen de la fuente del disturbio.

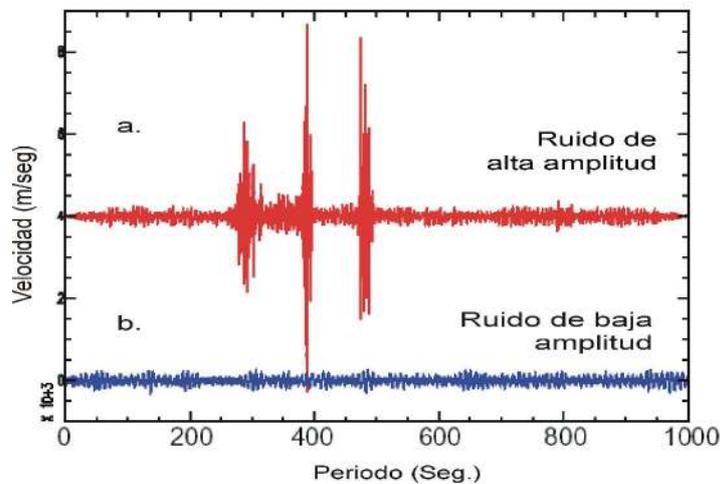


Figura 5.4. (a) Se observa el ruido correspondiente al producido por el paso de un Vehículo cerca de la estación (b) Ruido sísmico registrado un sitio tranquilo (McNamara y Buland, 2003).

### 5.2.2 Ruido Climático y Geológico

Los objetos se mueven cuando responden a la acción del viento y este movimiento cuando está acoplado a tierra puede ser fuente importante del ruido sísmico. En general, la turbulencia del viento alrededor de las irregularidades de la topografía y el acoplador movimiento del árbol a la tierra a través de sus raíces, generan señales de ruido de alta frecuencia (Berger, 1988). Además, el viento que actúa en objetos grandes, tales como torres y postes de teléfono puede causar la inclinación del terreno aparece como ruido de período más largo. Como fuentes adicionales e este tipo de ruido pueden incluirse las corrientes de agua y la actividad volcánica.

En la Figura 5.5 Se muestra una ventana de 2600 seg. de longitud de registro que corresponde a las 12:00 horas del día 1 de Agosto del 2005 en la componente Norte de la estación sísmica de banda ancha de Cotahuasi (Arequipa) perteneciente a la RSN. y en ella se puede apreciar un ejemplo de ruido posiblemente causado por el impacto del viento sobre árboles ubicados cerca de la estación sísmica. En la figura se puede observar la presencia de trenes de ondas sísmicas de alta frecuencia y también el ruido cultural presente en la zona.

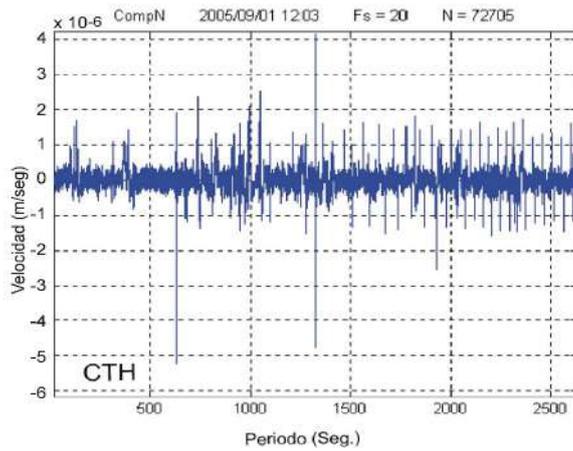


Figura 5.5 Ruido causado por el impacto del viento sobre los árboles en la estación sísmica de Cotahuasi (CTH).

### 5.2.3 Ruido Instrumental

Este tipo de ruido se genera por cambios de estabilidad del equipo y sus partes por efectos de la presión atmosférica. En general, los efectos sobre la masa que se encuentra en continuo movimiento (los elementos en suspensión se doblan) o durante el proceso de digitalización (rango dinámico limitado del convertidor análogo/digital).

En la Figura 5.6 se muestra una ventana de 510 seg. de longitud de registro que corresponde a las 06:00 a.m. (hora local) del día 1 de Agosto del 2005 para la componente Este de la estación sísmica de banda ancha de Cotahuasi (CTH). En este registro se observa un claro ejemplo de ruido de periodo largo (bajas frecuencias) producido por los cambios de Presión Atmosférica.

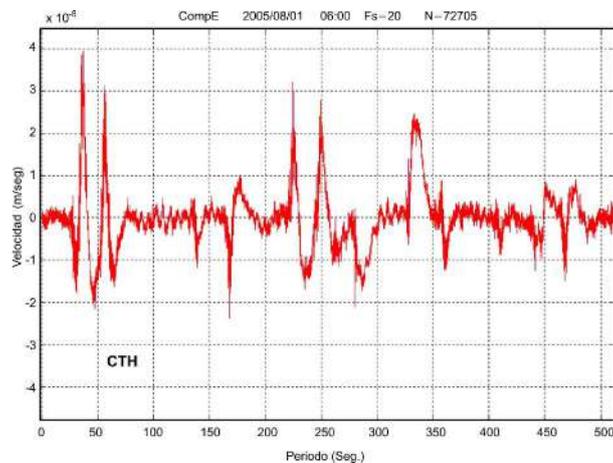


Figura 5.6 Ejemplo del registro de ruidos de baja frecuencia, causado por los cambios en la Presión Atmosférica correspondiente a la estación de CTH.

Otros tipos de ruido instrumentales, pero poco frecuentes, son los debidos a pulsos de calibración, fallas en el sistema de adquisición de datos o la mala posición del sensor debido a cambios en la superficie sobre la cual esta posicionado (Figura 5.8). El conocimiento de este tipo de ruido es útil para el operador de la red.

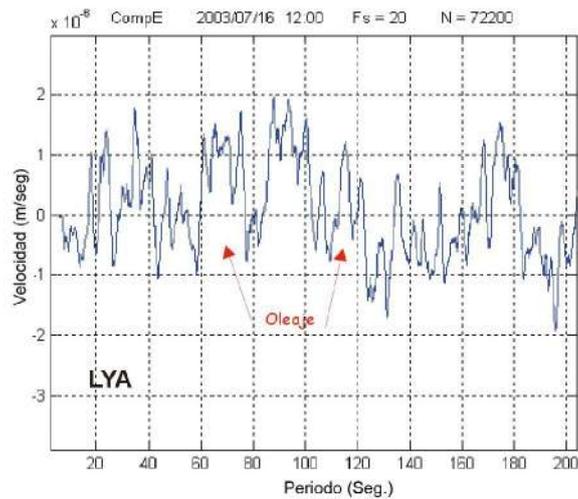


Figura 5.8 Muestra los diferentes tipos de ruidos instrumentales de baja probabilidad de ocurrencia (McNamara y Buland 2003).

#### 5.2.4 Microsismos

Se definen como las oscilaciones naturales y regulares del subsuelo que no son producidos por los terremotos ni por fuentes artificiales como el tráfico o la maquinaria industrial, si no que son inducidas por fuentes naturales como el oleaje en los océanos y las tormentas oceánicas, Este tipo de ruido esta compuesto principalmente por ondas Rayleigh de periodo relativamente largo (> 3 segundos), y aparece en los registros, demostrando que la corteza terrestre está en continuo estado de movimiento.

En la Figura 5.7 se muestra una ventana de 200 seg. de longitud de registro que corresponde a las 12:00 horas de la noche del día 16 de Julio del 2003 en la componente Este de la estación sísmica de banda ancha La Yarada – LYA (Tacna).y en ella se puede apreciar el registro de ruido de periodo largo producido posiblemente por el choque de las olas en la costa, ya que se caracteriza por sus bajas frecuencias con periodos del orden de 10 a 20 seg.



*Figura 5.7 Ruido sísmico de fondo producido por las olas de mar en la estación sísmica LYA.*

En general, los tipos de ruido pueden ser clasificados en ruidos de periodo corto y ruidos de periodo largo, y ellos son generados por diversidad de fuentes naturales y artificiales cuyas características van a depender del lugar en donde se sitúa la estación sísmica.

Los ruidos de periodo corto, presentan altas frecuencias con rangos que se encuentran entre 1 a 10 Hz y en general, este tipo de ruido tiene que ver con la actividad diaria del hombre y aquellos producidos por las explosiones en las minas, el paso de vehículos en las carreteras o por la inducción del viento sobre árboles en la cercanías de la estación sísmica. Para evitar al máximo las perturbaciones de periodo corto sobre los sensores, es recomendable acondicionarlos en pozos aislantes sobre roca dura a una relativa profundidad y lejos de las fuentes artificiales de ruido sísmico.

El ruido de periodo largo, se caracteriza por presentar bajas frecuencias (<1 Hz.) y se registran con mayor amplitud en las componentes horizontales. En general, se considera que son debidos a la acción de las ondas oceánicas sobre las costas con frecuencias de 0.09 a 0.4 Hz y las ondas oceánicas estacionarias causadas por las oscilaciones del mar debido al viento y a las tormentas con frecuencias del orden de 0.4 a 0.9 Hz. (Peterson, 1993). Así mismo se debe considerar a los producidos por las fluctuaciones barométricas en la zona donde se encuentra la estación sísmica; es decir, por frentes atmosféricos fríos y de calor que perturban directamente a los sismómetros (Muller y Zurn, 1983). La presión del aire varía entre 0.1 mHz y 0.01 Hz, (Beauduin 1996).

Para reducir el ruido causado por las fluctuaciones barométricas, en la data sísmica y facilitar los estudios sobre el contenido de periodos largos para eventos sísmicos de gran tamaño, se requiere simultáneamente registrar las variaciones de la presión barométrica cerca del sismómetro y luego sustraer con una función apropiada su interferencia en la señal (Beauduin, 1996). En la practica, se ha visto que las estaciones sísmicas de banda ancha que se encuentran instaladas en el interior de pozos, túneles, cavernas y sobre roca dura disminuyen el nivel de ruido en la banda de frecuencias 0.01 a 0.1 Hz

### 5.3 Filtrado del Ruido

Para atenuar el efecto del ruido presente en los registros sísmicos, frecuentemente se utiliza la herramienta del filtrado de la señal a fin de reforzar la calidad de la información que se quiere extraer del registro. (Gershanik, 1996). Para lograr el filtrado de los registros conviene poner de manifiesto su estructura espectral, lo que se consigue aplicando la Transformada de Fourier.

Llamando  $f_1(t)$  a la función que representa un registro en el dominio del tiempo se tiene,

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_1(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (5.1)$$

y para la misma en el dominio de las frecuencias,

$$F_1(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(t) e^{-i\omega t} d\omega \quad (5.2)$$

o sea, la Transformada de Fourier de  $f_1(t)$ .

Multiplicando la integral de (5.1),  $F_1(\omega)$  por la función  $F_2(\omega)$  se convierte la función  $f_1(t)$  en otra como  $f_{12}(t)$

$$f_{12}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_{12}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (5.3)$$

$$F_{12}(\omega) = F_1(\omega) F_2(\omega) \quad (5.4)$$

En el contenido espectral  $F_{12}(\omega)$  sobresalen determinadas frecuencias en las que se tiene interés y se atenúan las que sean ruido. Si se desea una apropiada función  $F_2(\omega)$ , la función al ser introducida en (5.1), se comporta por consiguiente como un filtro y la función  $f_{12}(t)$ , resulta ser lo que queda de la función  $f_1(t)$  después de ser filtrada.

Además de lo precedente y sustituyendo en (5.4)  $F_1(\omega)$  la expresión (5.2) y detallando la (5.3) se tiene,

$$\begin{aligned} f_{12}(t) &= \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_2(\omega) e^{i\omega t} d\omega \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) d\tau \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_2(\omega) e^{i\omega(t-\tau)} d\omega \end{aligned}$$

Por lo tanto, si  $F_2(\omega)$  es la Transformada de Fourier de una función  $f_2(t)$ :

$$f_{12}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau \quad (5.5)$$

y por ello también,

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_1(\omega) F_2(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau \quad (5.6)$$

El resultado de intercambio de roles de  $f_1(t)$  y de  $f_2(t)$  se puede escribir como:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_1(\omega) F_2(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_2(\tau) f_1(t-\tau) d\tau \quad (5.7)$$

de lo que también resulta,

$$\int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau = \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(t-\tau) f_2(\tau) d\tau \quad (5.8)$$

Con análogos procedimientos, pero tratando de hallar la Transformada de Fourier del producto  $f_1(t) f_2(t)$  se obtiene:

$$\int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(t) f_2 e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_1(\omega) F_2(\omega_0 - \omega) d\omega$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_2(\omega) F_1(\omega_0 - \omega) d\omega$$

Las expresiones (5.5), (5.6), (5.7) y (5.8) se dice que son convoluciones de las funciones involucradas y las ecuaciones (5.6) y (5.7) el producto de sus componentes espectrales. Análogamente, las igualdades (5.8) y (5.4) muestran que multiplicar dos funciones en el dominio del tiempo, equivale a la convolución de sus componentes espectrales en el dominio de las frecuencias.

Entonces, resulta obvio que el filtrado de una función  $f_1(t)$  puede hacerse o bien usando  $F_2(\omega)$  en el dominio de las frecuencias o bien usando la inversa  $f_2(t)$  en el dominio del tiempo. A los filtros se les clasifica en filtros pasa bajo, filtros pasa altos y filtros pasa banda, y como lo expresan sus nombres, los primeros no atenúan las componentes espectrales de frecuencias bajas, los segundos no atenúan los de frecuencia alta y los últimos, no atenúan dentro determinados límites de frecuencia.

#### 5.4 Relación Señal / Ruido

La relación señal/ruido (Signal to noise ratio SNR, ó S/N), se define como el margen que hay entre el nivel de referencia (información significativa) y el ruido de fondo de un determinado sistema. La relación señal/ruido, es la comparación entre la amplitud de la señal sísmica y la amplitud del ruido natural/artificial. En términos cuantitativos, el ruido representa la energía de la señal para una frecuencia dada, dividida por la energía remanente causada por el ruido (Zmeskal y Plesinger, 1995).

Los factores fundamentales que controlan el índice y la calidad de la transmisión de la información sísmica son el ancho de banda (B) y la Potencia de la Señal (S). El ancho de banda de un canal, es el rango de frecuencias que este puede transmitir con razonable fidelidad; por ejemplo, una estación sísmica de banda ancha tiene un ancho de banda de 0.01 a 50 Hz.y la potencia de la señal desempeña un papel dual en la transmisión de la información, (S esta relacionado con la calidad de transmisión). Al incrementarse S a la potencia de la señal, se reduce el efecto del ruido de canal y la información se recibe con mayor exactitud o con menos incertidumbre. Una mayor relación de señal/ruido permite también la transmisión a

través de una mayor distancia. En cualquier caso, una cierta relación de señal/ruido mínima es necesaria para la comunicación.

Un criterio para elegir un tipo de filtro adecuado para eliminar el ruido sísmico de fondo, es evaluar previamente la relación señal/ruido. En la práctica se ha mostrado que esta relación debe ser mayor a 80 a fin de contar con registros de calidad cuando los sismos tienen magnitudes mayores a 5.8 M. (Tavera y Buforn 1998).

### **5.5 Variaciones del Ruido debido a Condiciones Locales**

La variación de los niveles del ruido debido a las condiciones locales es comúnmente conocida como efectos de sitio, y esta directamente relacionada con la respuesta del suelo al paso de las ondas sísmicas generadas por los ruidos los que pueden ser tanto de periodo corto como de periodo largo. Las variaciones del ruido debido a condiciones locales fundamentalmente van a depender de la posición geográfica en la que se encuentra situada una estación sísmica, la posición del sensor respecto al tipo de material que componen las rocas en las capas del subsuelo, las fluctuaciones locales de presión atmosférica y temperatura que ocurren en la zona (Nicolae, 2002)

Así por ejemplo, cuando la estación sísmica se encuentra ubicada sobre suelos geocronológicamente jóvenes (materiales blandos poco consolidados) el nivel de ruido dependerá principalmente del espesor de la capa sedimentaria. Por ejemplo, para espesores de 1.5 Km. se tiene frecuencias de 0.04 a 0.09 Hz, para espesores de 290 m. se tiene frecuencias de 0.2 a 0.5 Hz y para espesores del orden de 50 m entre 1.1 a 2.8 Hz (Bormann,1997). El umbral de frecuencia donde la amplificación del suelo comienza a tener importancia, esta cerca de los 3.5 Hz. y si la frecuencia natural sobrepasa este valor, se puede aplicar el espectro de respuesta desarrollado para un sitio de referencia en roca.

## CAPITULO VI

### METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RUIDO SÍSMICO

A fin de conocer las características de los niveles de ruido existente en las estaciones de banda ancha de la RSN se hace uso del método Densidad de Potencia Espectral (PSD). Este método ha sido ampliamente utilizado por diversos autores para el estudio de las redes mundiales (Peterson, 1993), GEOSCOPE (Stutzmann, 2000), nacionales como la de Alemania (Bormann, 1997), España (Chavarria, 2001), Estado Unidos (McNamara, 2003) y redes temporales (Aki y Richards, 1980) y (Wilson y Joseph, 2002). De estos estudios, el realizado por Peterson (1993) para las 780 estaciones de la red sísmica mundial, ha venido siendo utilizado como referencia en razón que ha presentado establecer niveles máximos y mínimos de ruido y asociarlos a las características de las estaciones, tanto en su infraestructura como el suelo sobre el cual fueron instaladas las estaciones.

En la Figura 6.1 se presenta las curvas de PSD y la curva de mínimo nivel de ruido (NLNM) corresponde a estaciones con sismómetros triaxiales que se encuentran ubicadas en continente, sobre roca dura y alejadas de fuentes de ruido natural o artificial; es decir, colocadas en el interior de pozos y túneles hasta 100 m de profundidad y protegidos térmicamente de los bruscos cambios climáticos. La curva del modelo de alto nivel de ruido (NHNM) es un promedio de los espectros con mayores amplitudes de ruido en las estaciones de la red ubicados en diversidad de infraestructura y tipos de suelo.

En general, Peterson (1993) presenta la estructura global del ruido sísmico de la Tierra para una banda de frecuencias de  $10^{-5}$  a  $10^2$  Hz. (Figura 6.1.), presentados en decibeles (dB) con respecto a la aceleración  $(m/s^2)^2/Hz$ , en función del periodo (Seg.) y/o la frecuencia (Hz.). En dicha figura se observa que para frecuencias mayores a 1 Hz. la turbulencia del viento y las actividades humanas (ruido cultural) podrían ser la principal causa del ruido. También se puede identificar 2 picos importantes, el primero de mayor amplitud a una frecuencia de 0.3 Hz y otro de menor amplitud cerca de 0.09 Hz, ambas curvas parecen tener relación con las ondas oceánicas (Longuet-Higgins, 1950).

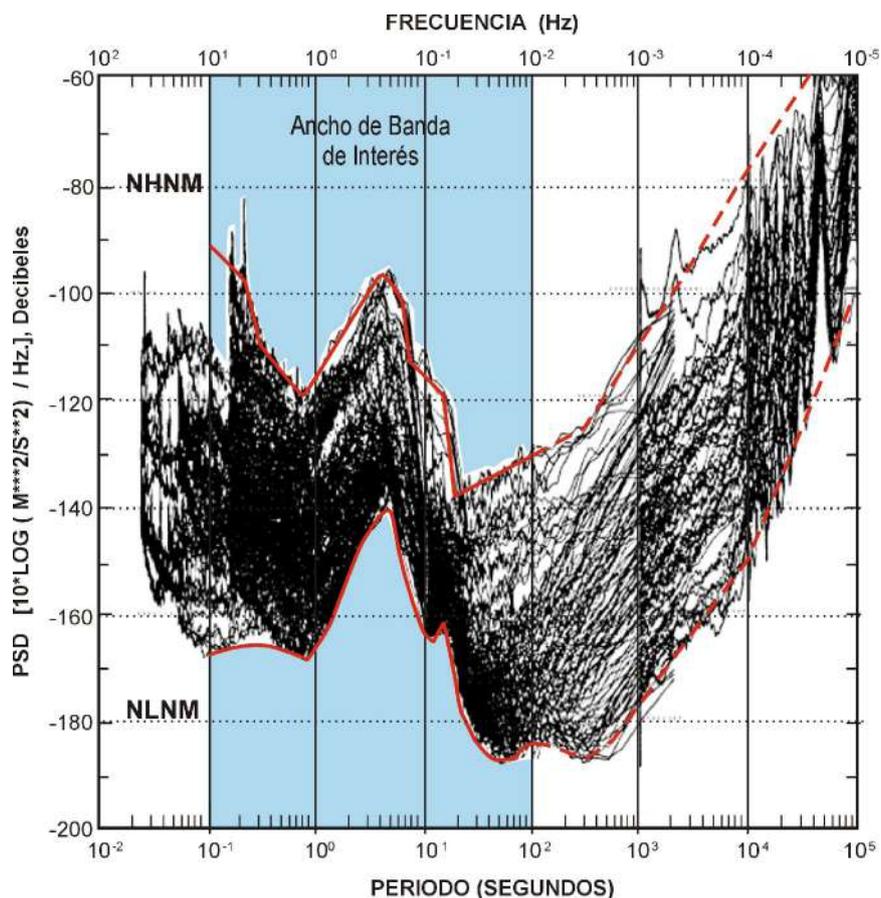


Figura 6.1. Curvas de PSD que muestran el Modelo de alto (NHNM) y bajo (NLNM) Niveles de Ruido para la red sísmica mundial (Peterson, 1993).

El pico principal de mayor amplitud se encuentra en un rango de frecuencias de 0.3 a 0.9 Hz. y es conocido como el “Pico microsísmico de la doble frecuencia”, porque en ella se registran las ondas oceánicas producidas por fuertes vientos asociados a tormentas que se producen en el océano (Ramírez, 1940), o debido a las ondas oceánicas que al viajar en direcciones opuestas crean ondas estacionarias en la mitad del periodo de la fuente, las que interactúan con una doble energía y generan otras ondas elásticas, esencialmente ondas Rayleigh. Los ruidos que presentan mayor amplitud son debidas a grandes tormentas y la suave inclinación de la pendiente de la curva hacia frecuencias mayores y cercanas a 1 Hz. son debidas al hecho de que las amplitudes de las ondas oceánicas se saturan en altas frecuencias y la atenuación de las ondas Rayleigh dentro de la Tierra se incrementa a bajas frecuencias (Pierson y Moskowitz, 1963; McCreery *et al.*, 1993; Webb, 1998).

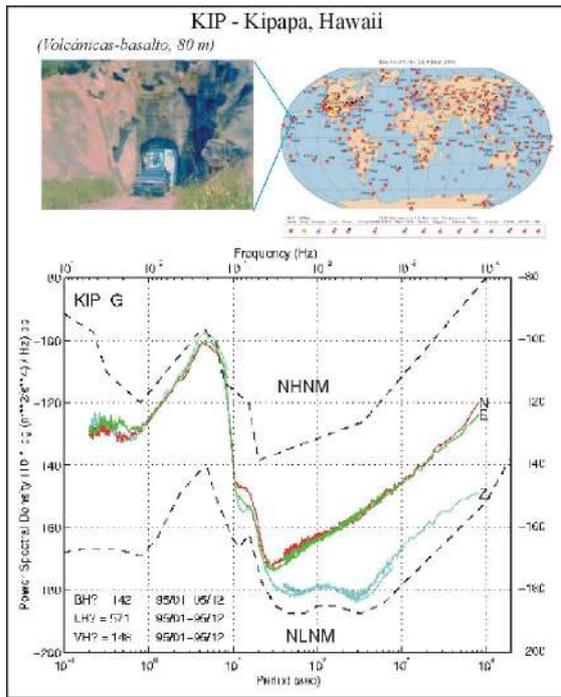
Así mismo, en los rangos de frecuencia de 0.09 a 0.4 Hz. se observa un pico de ruido de menor amplitud que el pico de la doble frecuencia, llamado pico de una sola frecuencia, las tormentas y el océano serian también el origen de este pico pero

por un proceso diferente. En este caso las ondas oceánicas chocan en la costa e inducen y transfieren directamente la energía en ondas elásticas (ondas Rayleigh) a través del acoplamiento no lineal de ondas y batimetría (Hasselmann, 1963). Para el rango de frecuencias de 0.01 a 0.05 Hz, Sorrells (1971) demostró que las perturbaciones atmosféricas producen incrementos en los niveles de ruido con diferentes mecanismos para las componentes verticales y horizontales. La presión atmosférica local produce una descarga estática del terreno, la cual genera movimientos en el terreno y son la principal fuente de ruido en las componentes verticales; mientras que en las componentes horizontales son pequeñas pero generan perturbaciones del suelo de acuerdo al tipo de roca. Este efecto puede ser substancialmente reducido al instalarse los instrumentos en profundidad.

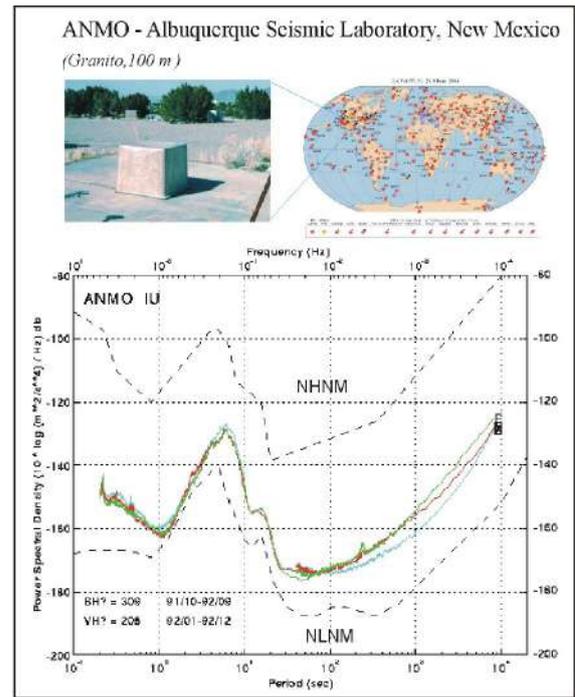
Para las más bajas frecuencias (<0.01 Hz.), Muller y Zurn (1983) demostraron que el ruido sísmico es debido a los cambios de la atracción gravitacional. Ellos observaron que los cambios de la atracción de la gravedad pueden ser inducidos por las perturbaciones locales de la presión durante el pasaje de frentes fríos. Una variación de la presión del aire cambia la atracción gravitacional de la masa del sensor por la atmósfera y por la aceleración del terreno, la cual genera ruido sísmico. Zurn y Widmer (1995) y Beuadiun (1996), demostraron que el ruido sísmico en las más bajas frecuencias puede ser eliminado por la deconvolución de la data sísmica con los datos de presión atmosférica.

Algunos ejemplos de los niveles de ruido evaluados por Peterson (1993), son mostrados en la Figura 6.2 y corresponden a las estaciones sísmicas de banda ancha KIP, NNA, ANMO y CBS.

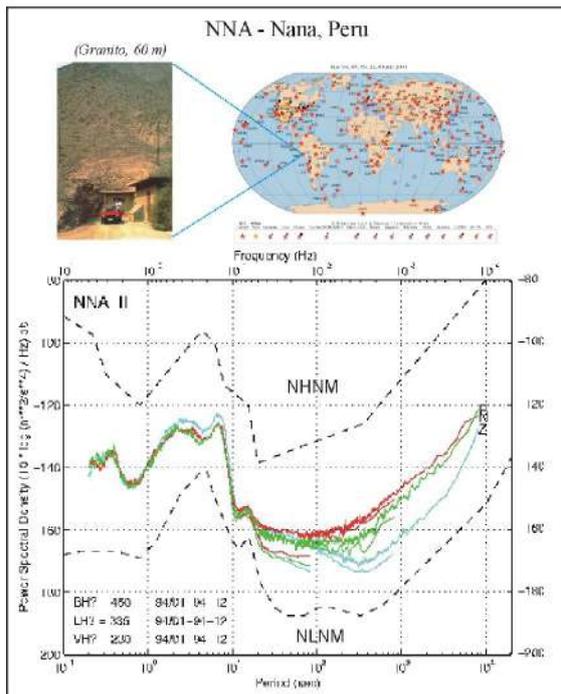
**Estación KIP (Kipapa):** Se encuentra en las Islas de Haway, y la estación sísmica tiene el sensor ubicado a 80 m en el interior de un túnel sobre un pilar de cemento con base rocosa (basalto), (Figura 6.2a). En la que se observa que para la banda de frecuencias de 0.3 a 0.9 Hz el nivel de ruido es alto cercana a la curva (NHNM), lo cual sería debido a que la estación se encuentra ubicada en una isla; Sin embargo, para frecuencias menores a 0.01 Hz. el nivel de ruido está cerca a la curva de bajo nivel de ruido (NLNM) principalmente para la componente vertical, esto sería posible debido a que el sensor sísmico se encuentra ubicado en el interior de un túnel y protegido a las fluctuaciones locales de la presión atmosférica.



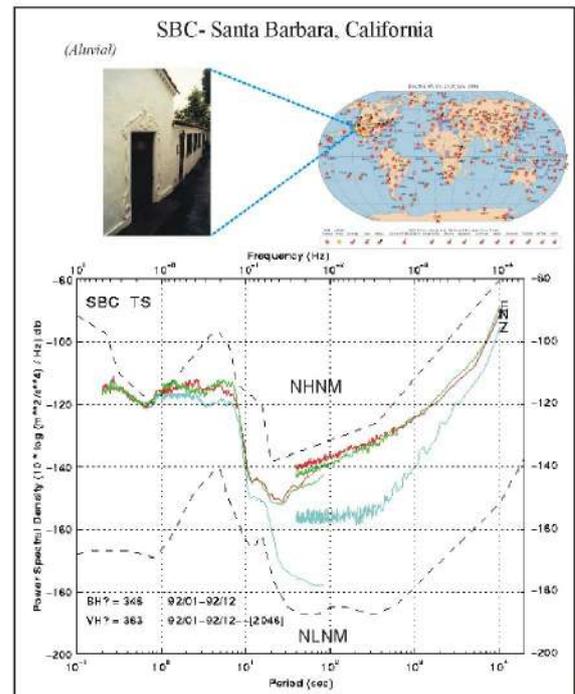
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 6.2 En los gráficos se muestra las curvas de PSD obtenidas para las estaciones de KIP, NNA, ANMO y CBC según Peterson (1993). Obsérvese las variaciones del nivel de ruido para las estaciones ubicadas en superficie y en el interior de túneles. Las curvas de color celeste corresponden a la componente Vertical, verde componente E y rojo componente N.

**Estación NNA (Ñaña):** Se encuentra en Perú (Lima) y la estación sísmica ha sido instalada sobre rocas graníticas (Figura 6.2b). Las curvas de PSD indican que para las altas frecuencias ( $> 1$  Hz) el nivel de ruido es intermedio en relación a las curvas de alto (NHNM) y bajo (NLNM) nivel de ruido. Para el rango de frecuencias de 0.3 a 0.9 Hz. presenta también nivel de ruido intermedio y posiblemente se deba por su cercanía al océano pacífico. Por otro lado, para frecuencias menores a 0.01 Hz. los niveles de ruido son bajos y cercanos a la curva de mínimo nivel de ruido, lo cual se debe a que la estación se encuentra en un túnel y protegido de las fluctuaciones barométricas.

**Estación ANMO (New Mexico):** Se encuentra ubicada en Estados Unidos de Norte América y en las instalaciones del Observatorio Sismológico de Albuquerque. El sensor de la estación se encuentra sobre rocas graníticas ubicado a 100 m. en el interior de un pozo (Figura 6.2c). En dicha figura se observa que para las altas frecuencias ( $> 1$  Hz.) y bajas frecuencias (0.01 a 1 Hz) las curvas de respuesta PSD's están cercanas a la curva de mínimo nivel de ruido (NLNM), lo cual se debe a que la estación esta en continente lejos de las fuentes de ruido natural (oleaje); además el sensor esta sobre roca y en el interior de un pozo.

**Estación SBC (Santa Bárbara California):** Se encuentra ubicada al Oeste de los Estados Unidos y los sensores de la estación están sobre un pilar de concreto construido sobre rocas de material aluvial (arenas y gravas) del cuaternario; por lo tanto la estación sísmica se encuentra en la superficie (Figura 6.2d). Las PSD muestran que el nivel de ruido para las altas frecuencias ( $>1$  Hz.) se encuentra cercana a la curva de alto nivel de ruido NHNM, y es debido a la alta influencia del ruido cultural y por el tipo de suelo. Así mismo, para las bajas frecuencias ( $<0.1$  Hz.) el nivel de ruido es alto debido a que la estación se encuentra en superficie y sobre material aluvial lo que hace posible que sea afectada por las fluctuaciones locales de la presión atmosférica.

## 6.1 Caracterización del Ruido Sísmico

Del análisis de los niveles de ruido sísmico realizados para redes sísmicas Peterson (1993), Stutzmann (2000), Bormann, (1997), Chavarria, (2001), McNamara (2003), Aki y Richard (1980), ha permitido identificar en función de los rangos de frecuencias predominantes las posibles fuentes de origen del ruido y todos ellas son resumidos en la Tabla N° 6.1. Además se explica los principales tipos de ruidos, sus

características de origen; así como, el rango de frecuencias dentro de la cual se les puede se les puede identificar.

TIPOS DE RUIDO	CARACTERISTICAS	FRECUENCIAS (Hz)
Ruidos Producidos por el tráfico de Vehículos	Dependen de la distancia de la Estación a la Carretera	Las frecuencias oscilan con valores mayores a 5 Hz. ( $f > 5$ Hz.)
Ruidos Producidos por el viento J. Berger.	Ruidos producidos por el impacto del viento en árboles cerca de la estación.	Las frecuencias oscilan con valores mayores a 4 Hz. ( $f > 4$ Hz.)
Ruidos producidas por el Hombre	Esta relacionado a la actividad diaria del hombre generalmente se presentan en estaciones cerca de los poblados.	Las frecuencias varían de 1 a $f > 2$ Hz. Dependiendo de la distancia de la ciudad a la estación.
Ruido Producido por resonancia de frecuencias por el tipo de suelo.	Cuando la estación se encuentra ubicado sobre un suelo suelto (depósitos cuaternarios – Terciarios), estas dependen del espesor de la capa sedimentaria.	Por ejemplo: 0.04 a 0.09 Hz para 1.5 Km. 0.2 a 0.5 Hz para 290 m. 1.1 a 2.8 Hz para 50 m.
Ruidos Producidos por la actividad Minera.	Dependen de la distancia de la Estación sísmica a la Mina.	Las frecuencias varían $f > 0.5$ Hz.
Ruidos hechos por el Hombre.	En estaciones de Roca dura	Las frecuencias $f > 1$ Hz
Ruido producido por contraste de impedancia Acústica.	Contraste entre limonitas triásicas y depósitos del cuaternario	Las frecuencias son $f > 1$ Hz.
Olas del Mar	Ruidos producidos por el choque de las Olas de Mar con el litoral de la costa. Las Variaciones son por la proximidad de la Estación al Mar.	Las frecuencias oscilan entre $0.06 \text{ Hz} < f < 0.3 \text{ Hz}$ .
Tormentas oceánicas.	Microsismos naturales ocurridos en el fondo del mar producido por las ondas sísmicas estacionarias causadas por el oleaje.	Las frecuencias Están entre 0.3 y 0.5 Hz.
Presión Atmosférica	Ruidos producidos por efectos de las fluctuaciones locales de la presión Atmosférica.	Las frecuencias Se encuentran entre 0.001 a 0.05 Hz.

*Tabla 6.1. Rangos de frecuencias correspondientes a las fuentes de ruido más comunes registradas en una estación sísmica de banda ancha.*

De los resultados obtenidos por los autores antes mencionados y del resumen presentado en la Tabla N° 6.1, en la Figura 6.2 se presenta o esquematiza el rango de frecuencias de interés para este estudio, así como las posibles fuentes que las originan.

Los sismómetros de banda ancha son capaces de caracterizar el ruido en un amplio rango de frecuencias que van desde 0.008 a 50 Hz. Para el presente estudio se ha considerado el ancho de banda de interés en el rango de frecuencias de 0.01 a 10 Hz. limitado por el ancho de banda del sensor y la frecuencia de muestro ( 20 muestras por segundo) Además, porque en esta banda de frecuencias se encuentran los principales tipos de ondas sísmicas validos para el estudio de los terremotos y del interior de la Tierra, además de los ruidos sísmicos de interés local como son: ruido cultural, microsismos naturales (oleaje), ruido instrumental, ruido producido por los cambios de presión atmosférica y ruido geológico.

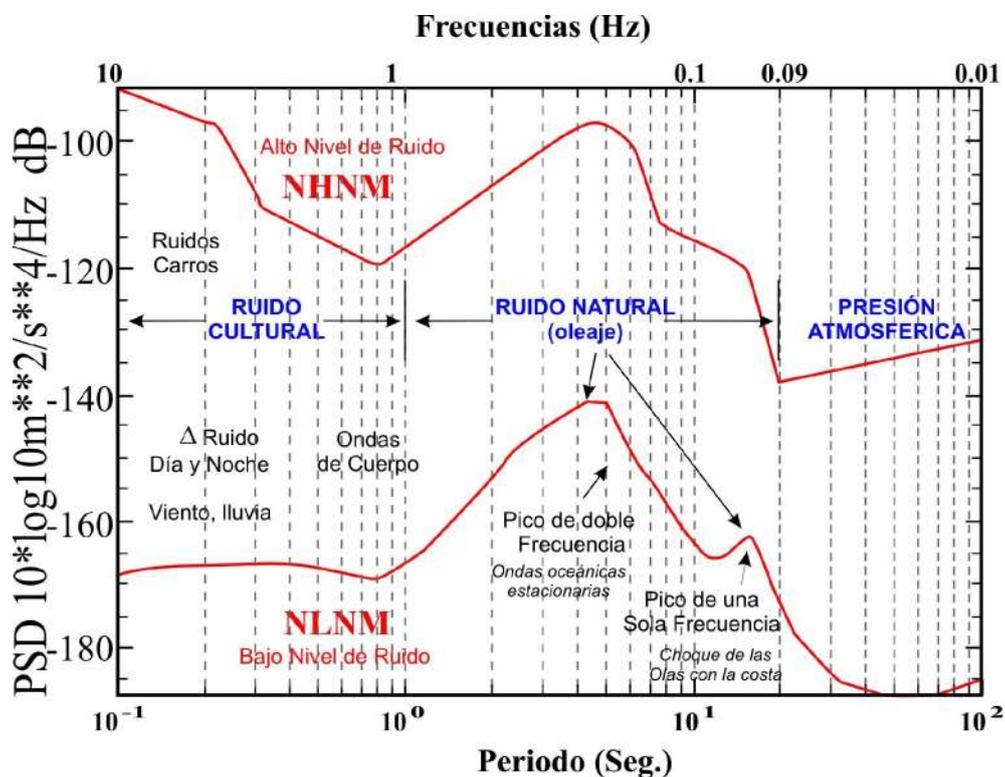


Figura 6.2 Se muestra las curvas de alto (NHNM) y bajo (NLNM) nivel de ruido propuesto por Peterson (1993) frente a las principales fuentes de ruido sísmico en función de sus frecuencias.

Los resultados que se obtengan del estudio de los niveles de ruido presente en las estaciones de banda ancha de la Red Sísmica Nacional serán comparados con los niveles de ruido propuestos por Petersón (1993) y afín de de identificar las posibles fuentes de origen del ruido en el Perú. Para tal fin, se hace uso de la Densidad de Potencia Espectral (PSD).

## 6.2 Densidad de Potencia Espectral (PSD)

El método estándar para cuantificar ruido sísmico de fondo es calcular la densidad espectral de potencia del ruido (PSD). El método más común para estimar el PSD para las señales sísmicas se llama Transformada directa de Fourier método de Cooley-Tukey (Cooley y Tukey, 1965). El método calcula el PSD vía un rango finito de transformada rápida de Fourier (FFT) a los datos originales y es ventajoso por su eficiencia computacional.

El rango finito de la transformada de Fourier de una serie de tiempo periódica  $y(t)$  es dada por:

$$Y(f, Tr) = \int_0^{Tr} y(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (6.1)$$

donde:

$Tr$  = longitud del segmento de serie de tiempo,  $2^{15} = 819.2$  s,

$f$  = frecuencia.

Para valores de la frecuencia discreta  $f_k$ , las componentes de Fourier son definidas como:

$$Y_k = \frac{Y(f_k, Tr)}{\Delta t} \quad (6.2)$$

Para,  $f_k = k/N\Delta t$  cuando  $k = 1, 2, \dots, N-1$ ,

donde:  $\Delta t$  = intervalo de muestreo (0.05 seg),

$N$  = Numero de muestras en cada segmento de serie de tiempo,  
 $N = Tr / \Delta t$ .

Por lo tanto, usando los componentes de Fourier arriba definidos, el total de la densidad de Potencia Espectral es definido como:

$$P_k = \frac{2\Delta t}{N} |Y_k|^2 \quad (6.3)$$

Como es evidente de (6.3), el total de la Potencia  $P_k$ , es simplemente el cuadrado del espectro de la amplitud con un factor de normalización de  $2\Delta t / N$ .

### 6.3 Selección de la Data

En la actualidad la RSN a cargo del IGP. cuenta con 15 estaciones de banda ancha de las cuales para este estudio se han considerado 9 estaciones sísmicas, las mismas que se encuentran distribuidas geométricamente en todo el territorio nacional (Figura 6.4)

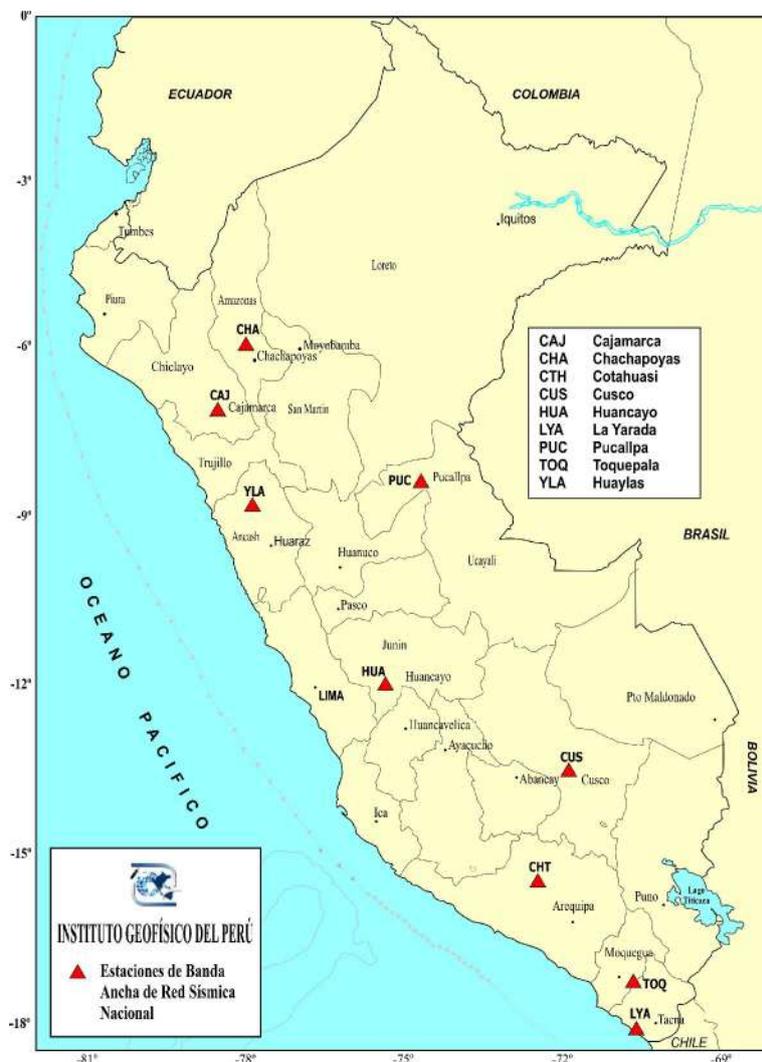


Figura 6.4. Distribución de las 9 estaciones sísmicas de banda ancha utilizadas en el presente estudio.

La selección de la data de los registros de ruido usados en este estudio se ha realizado de la base de datos existente en el Banco de Datos Sísmicos del IGP, para el periodo 2001 al 2005, considerando longitudes de registro de 1 hora ( 6.00 a.m. ,12:00 día, 6:00 p.m. y 12:00 noche, hora local) para cada muestra del año. Sen general se han considerado registros de ruido sin interferencias de sismos u otros fenómenos transientes como ruido instrumental (espacios vacíos de data, recortes,

picos, masa recentrada o pulsos de calibración). Al final se ha examinado el suficiente número de registros de tiempo para tener consistencia en los datos utilizados en el procesamiento final.

#### 6.4 Procesamiento de Datos

En el esquema de la Figura 6.5 se explica los pasos que se ha seguido para el procesamiento de la señal utilizada en la evaluación del ruido sísmico y que fueron integradas en un programa en lenguaje Matlab con el nombre RUIDOIGP.

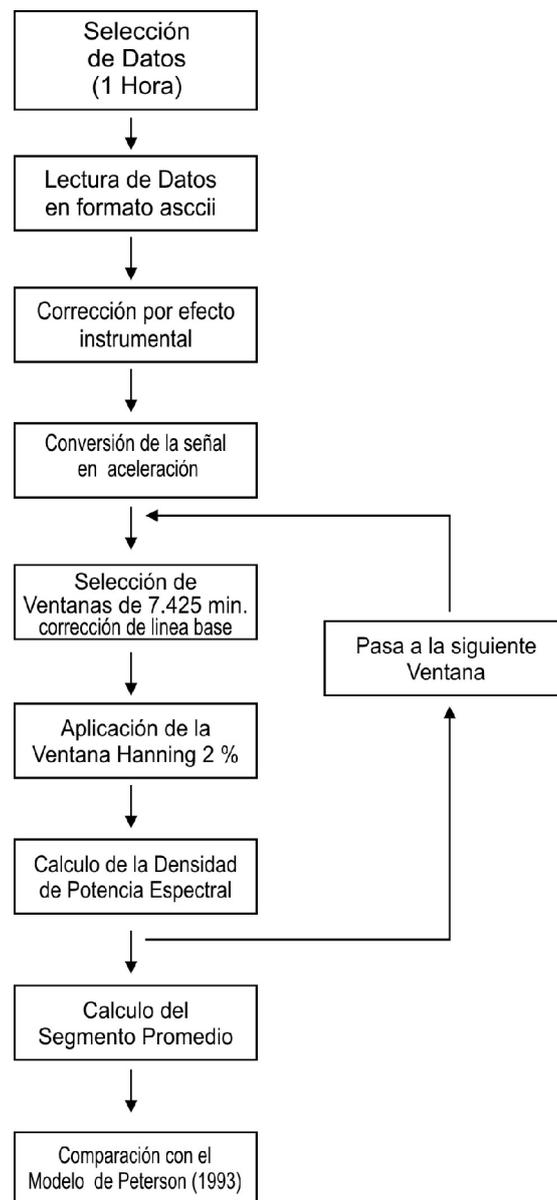


Figura 6.5 Esquema del diagrama de flujo seguido para la evaluación del ruido sísmico.

A continuación se describe secuencialmente los pasos seguidos y se muestra gráficamente el procesamiento de los datos.

- a) La señal es leída en formato ASCII y con registros de una hora de longitud (Figura 6.6a).
- b) Se realiza la corrección por efecto instrumental y se obtiene una señal corregida que representa el movimiento del terreno en m/seg (Figura 6.6b).
- c) Se convierte la señal de velocidad a aceleración, con tan solo derivar la señal respecto del tiempo y luego es convertida en decibeles (dB) con respecto a la aceleración ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )/Hz., además de corregirse por línea base (Figura 6.6c.).
- d) Se considera 12 ventanas de tiempo de 7,425 minutos (8910 muestras), para un muestreo de 20 s.p.s. y con un traslape de 75%, según la metodología establecida por Peterson (1993) (Figura 6.6c.).
- e) Se corrige el truncamiento en los extremos del registro utilizando ventanas de tipo Hanning (2%) a efectos de normalizar la ventana de señal (Figura 6.6c.).
- f) Se calcula las curvas de Densidad de Potencia Espectral (PSD) para cada una de las ventanas para obtenerse luego el valor promedio suavizado. Las curvas obtenidas se comparan con las propuestas por Peterson (1993), (Figuras 6.6d y 6.6e.).
- g) Se calculan curvas de PSD para diferentes horas del día con la finalidad de evaluar la variación diurna de los niveles de ruido sísmico (Figuras 6.6f.).

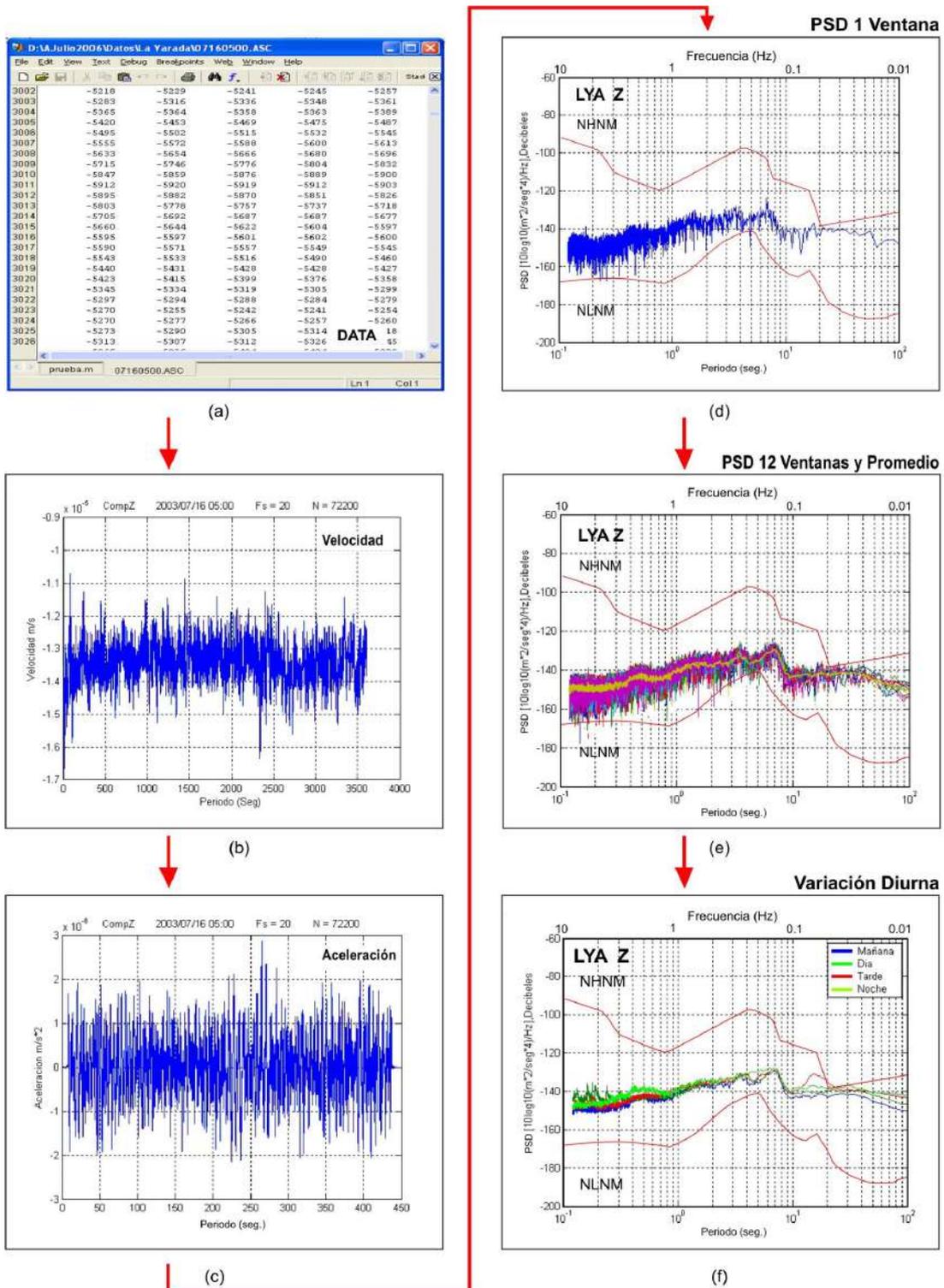


Figura 6.6 Secuencia seguida para la evaluación del ruido sísmico. a) Data de 1 hora de registro b) Señal de 1 hora en velocidad c) Ventana de 7.425 min. de la señal en aceleración, corregida por línea base y por el truncado con hanning (2%) d) PSD del ruido de 1 ventana de 7.425 min. e) PSD de 12 ventanas y el valor promedio y f) variación del ruido en diferentes horas del día.

Finalmente, los principales factores que se tendrán en cuenta durante la interpretación de los resultados obtenidos son los siguientes:

- Se evalúan las curvas de respuesta del PSD para cada una de las componentes según las frecuencias predominantes.
- Se tiene en cuenta la localización geográfica de la estación sísmica respecto a las principales fuentes de ruido sísmico (ruido cultural, microsismos, cambios climáticos).
- Se tiene en cuenta la posición del sensor respecto al tipo de roca y material geológico sobre el cual se encuentra la estación sísmica.
- Se evalúa la variación diurna, variación estacional y promedio anual de los niveles de ruido.
- Se comparan las curvas de PSD's de todas las estaciones utilizadas en este estudio y así identificar las estaciones que presentan mayores y menores niveles de ruido.

## CAPITULO VII

### APLICACIÓN A LAS ESTACIONES DE BANDA ANCHA DE LA RSN

En este capítulo se realiza la aplicación de la metodología descrita a 9 estaciones de la RSN y para tal fin, se discute la ubicación de la estación, la geología del área y el tipo de clima. Se obtienen los PSD para cada estación y el análisis de los niveles de ruido se realizará de acuerdo a lo indicado en Capítulo VI.

#### 7.1 Estación Sísmica de Pucallpa (PUC).

La estación sísmica de Pucallpa fue puesta en funcionamiento en Noviembre de 1997 y se encuentra en el departamento de Ucayali, a 15 Kms al Sur Oeste de la ciudad de Pucallpa y en el interior de las instalaciones de una misión Suiza con las siguientes coordenadas geográficas: Latitud Sur:  $08.397^{\circ}$  S, Longitud Oeste:  $74.668^{\circ}$ , Altitud: 130 m. Los instrumentos, tanto el de adquisición como el de registro se encuentran ubicados dentro de una caseta y sobre un pilar de concreto construido en terreno de cultivo (suelo aluvial), tal como se muestra en la Figura 7.1.1.



Figura 7.1.1 Ubicación de la estación sísmica de Pucallpa. Obsérvese el tipo de suelo aluvial, la presencia de vegetación y árboles.

### **7.1.1 Geología**

Geomorfológicamente, la estación sísmica se encuentra ubicada en el llano amazónico (Figura 7.1.2), siendo drenado por subcuencas secundarias que convergen a la cuenca principal del río Ucayali. Las estructuras geológicas presentes en la zona, van desde el Precámbrico y Paleozoico Inferior (aprox. 450 y 500 millones de años) hasta la formación Cuaternaria reciente (aprox. 10 millones de años). Las primeras están constituidas por sedimentos antiguos que han sido metamorfizados durante el proceso de levantamiento de los Andes y las segundas constituidas por depósitos aluviales y fluviales recientes intercalados con conglomerados de gravas, arenas y arcillas (De la Cruz, 1997). Localmente, la estación sísmica de Pucallpa, se encuentra ubicada sobre depósitos fluvio-aluviales de la Formación Ucayali, caracterizado por la presencia de capas de arcillas rojas a marrones y arenas marrón-amarillentas del Terciario Aluvial (aprox. 5 millones de años).

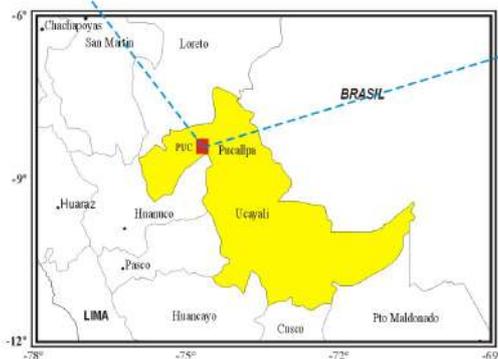
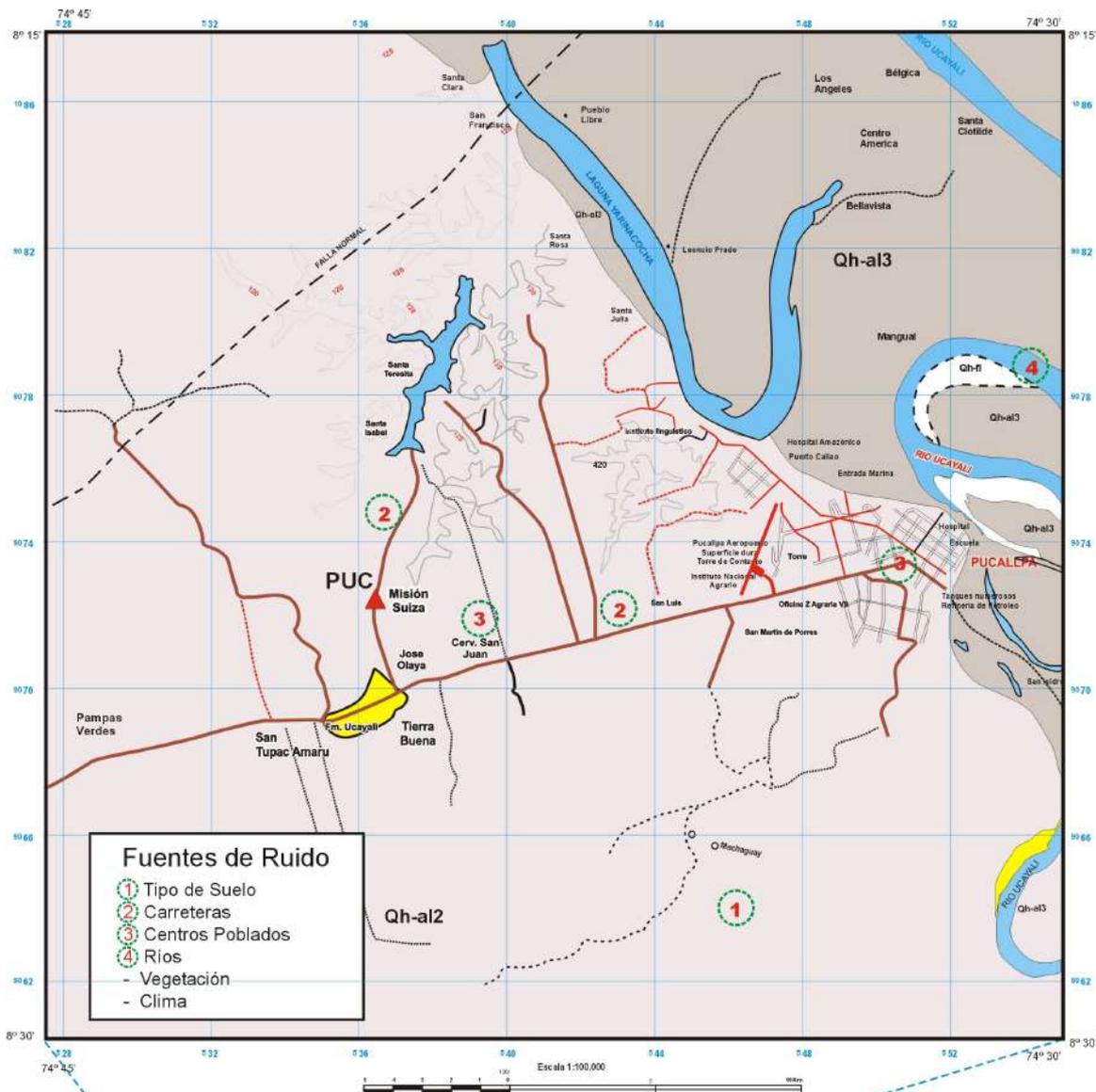
### **7.1.2 Clima**

La ciudad de Pucallpa esta situada a 154 m.s.n.m y a 842 Km. de Lima, se ubica sobre la margen izquierda del río Ucayali en el distrito de Cayeria, que es el punto fluvial más importante de la Selva Central. El clima de la región es cálido húmedo, con precipitaciones promedios que van desde 1 500 a 3500 mm. anuales y una temperatura promedio anual de 28° C. El clima predominante es el perteneciente a bosque Húmedo Tropical; es decir, de tipo cálido – húmedo, con ligeras variaciones que conforman las llamadas época seca y lluviosa. El promedio de precipitación es de 1535 a 2100 mm/año, y su distribución mensual se puede agrupar en los siguientes ciclos:

Ciclo lluvioso: Febrero – Mayo, Ciclo Seco: Junio – Agosto, Ciclo semi seco: Septiembre – Noviembre, Ciclo semilluvioso: Diciembre – Enero

Los vientos tienen una dirección predominante de norte a sur, con una velocidad promedio de 1.4 m/s. Los valores promedios de la Presión Atmosférica por estaciones son: en Verano de 1011.7 (mb), en Otoño de 1014.4 (mb), en Invierno de 1012.7 (mb) y en Primavera de 1008.5 (mb), estos valores corresponden al año 2001. En general la zona de estudio presenta dos estaciones climáticas influyentes relacionadas con los periodos de lluvia (Octubre a Abril) y moderada a poca (Mayo a Septiembre).

### PLANO DE UBICACION DE LA ESTACION DE PUCALLPA



**LEYENDA**

ERA/ETAPA	SISTEMA	SERIE	Unidades Litestratigráficas
CENOZOICA	CUATERNARIO	Holocena	Dep. Fluvial <b>Qh-f1</b>
			Dep. Aluvial <b>Qh-al1</b>
	<b>PLEISTOCENA</b>	<b>Dep. Aluvial <b>Qh-al2</b></b>	
		Fm. Ucayali <b>NO-u</b>	
MECENO	PLIOCENA		
	MIOCENA	Fm. Ipururo <b>M-1</b>	

Figura 7.1.2. Plano de localización geográfica y geológica de la estación de Pucallpa (PUC). Se muestra la posición de la estación respecto a las principales fuentes de ruido indicados con la numeración del 1 al 4 en el recuadro del mapa.

### 7.1.2 Variación Diurna de los Niveles del Ruido Sísmico

Para el análisis de las variaciones diurnas del nivel de ruido se han tomado registros de una hora, para la mañana (6:00 a.m.), medio día (12:00), tarde (18:00 p.m.) y media noche (12:00), correspondiente a los días 03 de Febrero, 05 de Mayo, 09 de Septiembre y 12 de Diciembre del año 2001. Las curvas de PSD se presentan en las Figuras 7.1.3 y 7.1.4 sobrepuestas en el modelo de Peterson (1993), siendo sus características principales las siguientes:

En las respuestas del PSD correspondientes a la variación diurna se observa la presencia de incrementos en las amplitudes para las frecuencias de 2 a 10 Hz, pudiendo ser debidos al ruido cultural producido por la actividad diaria del hombre, a la presencia de carreteras, pequeños poblados y áreas de cultivo en las cercanías de la estación. Durante la noche, el ruido se incrementa en 7 – 8 db, debido a que durante la noche la probabilidad de lluvia es mayor, además se debe considerar que la estación se encuentra en suelo aluvial lo que podría aumentar la amplificación del ruido. Del mismo modo, el incremento del ruido puede ser influenciado por la presencia de vegetación (arboles) en los alrededores de la estación que frecuentemente son afectados por el viento.

Para los ruidos de frecuencia media ( rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz.) se observa que el nivel de ruido no presenta variaciones diurnas significantes, estando las curvas de PSD en la parte media de los rangos establecidos por Peterson (1993); sin embargo, las amplitudes observadas podría deberse a efectos del mar, tal como explica Stutzmann (2000).

Para los ruidos de baja frecuencia ( rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz.), se observa que la estación de Pucallpa, presenta un nivel de ruido alto comparado con las curvas propuestas por Peterson (1993); lo cual probablemente se debería al ruido producido por las fluctuaciones locales de la presión atmosférica que afectaría a la estación sísmica por encontrarse cerca de la superficie del terreno.

Las componentes horizontales N y E de la estación de PUC (Figuras 7.3c y 7.4f), presentan un nivel mas alto de ruido respecto a la componente Z, para frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. debido a que probablemente son mas perturbadas por el ruido producido por los efectos de la presión atmosférica.

## VARIACION DIURNA

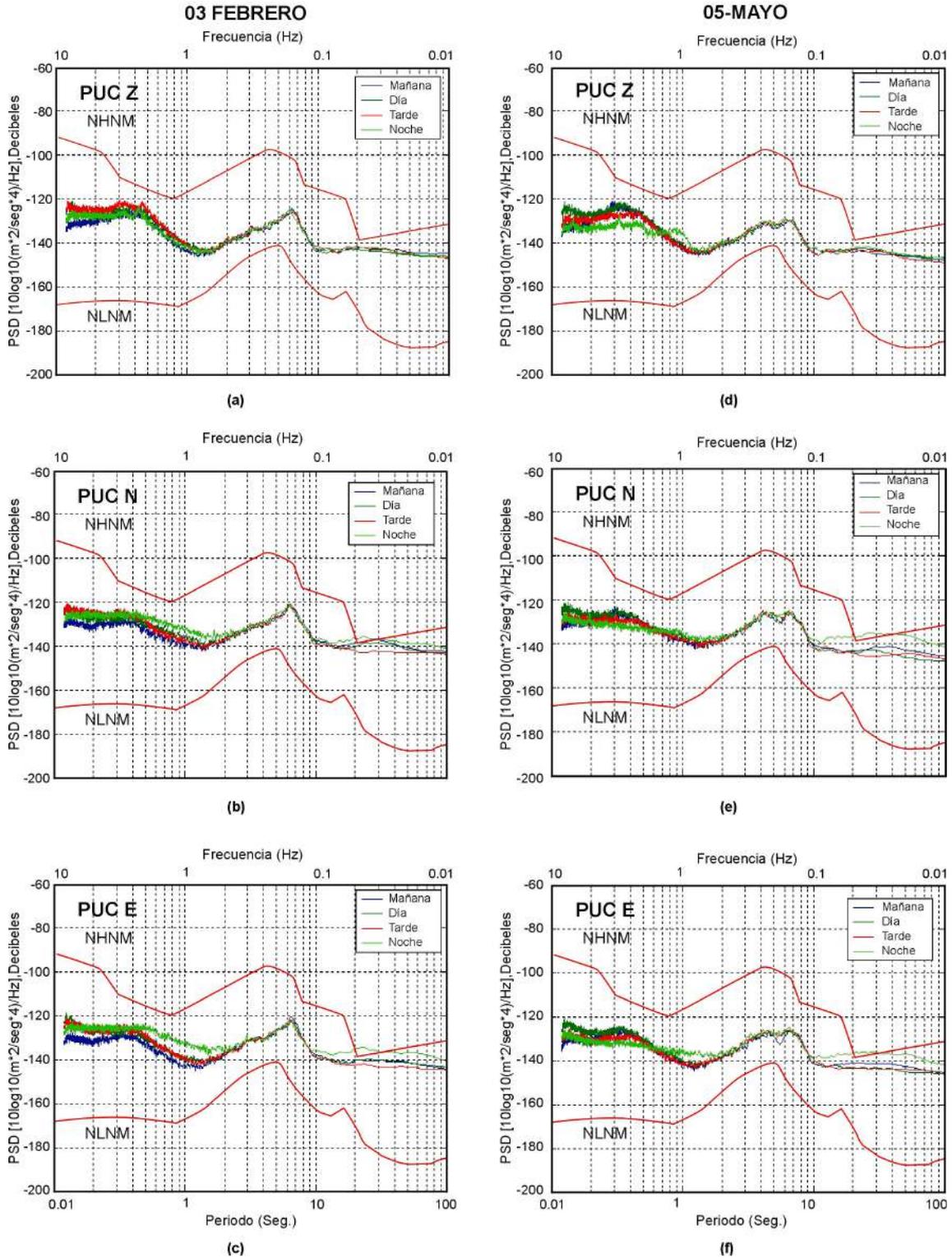


Figura 7.1.3 Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación PUC, para un día de los meses de Febrero y Mayo del Año 2001. Las curvas de color rojo corresponden a los PSD NHHM y NLNM según Peterson (1993).

## VARIACIÓN DIURNA

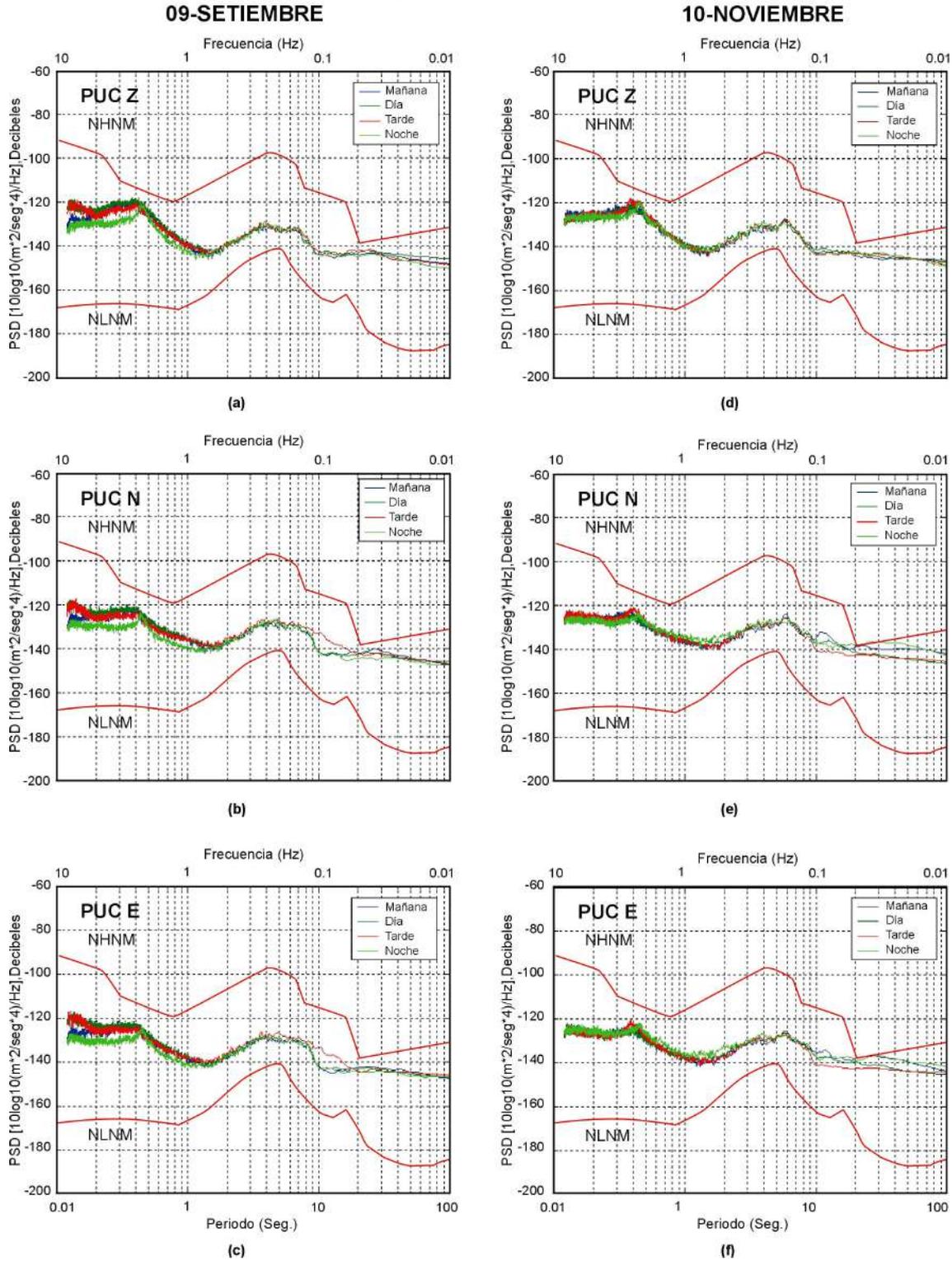


Figura 7.1.4 Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación PUC, para un día de los meses de Setiembre y Noviembre del año 2001. Las curvas de color rojo corresponden a los PSD NHNM y NLNM según Peterson (1993).

#### **7.1.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico**

A continuación se procede a analizar las variaciones de los niveles de ruido con respecto a los cambios estacionales durante el año (Figura 7.1.5). De manera general, para el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz. se observa que el nivel de ruido es alto durante todo el año, aunque se notan ligeros incrementos en la estación de primavera con amplitud en el orden de 7 dB. Esto probablemente se debería a que en esta época del año se incrementan los vientos y la lluvia en toda la zona.

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. se observa pequeños incrementos de hasta 6 dB en la estación de invierno, lo cual posiblemente se deba a que en esta época del año se incrementan el número de tormentas y vientos en el Pacífico Sur causados por el anticiclón del Pacífico Sur. Para el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. se observa variaciones durante el invierno, posiblemente por el descenso de las temperaturas y a los cambios locales de presión atmosférica en la zona.

## VARIACIÓN ESTACIONAL

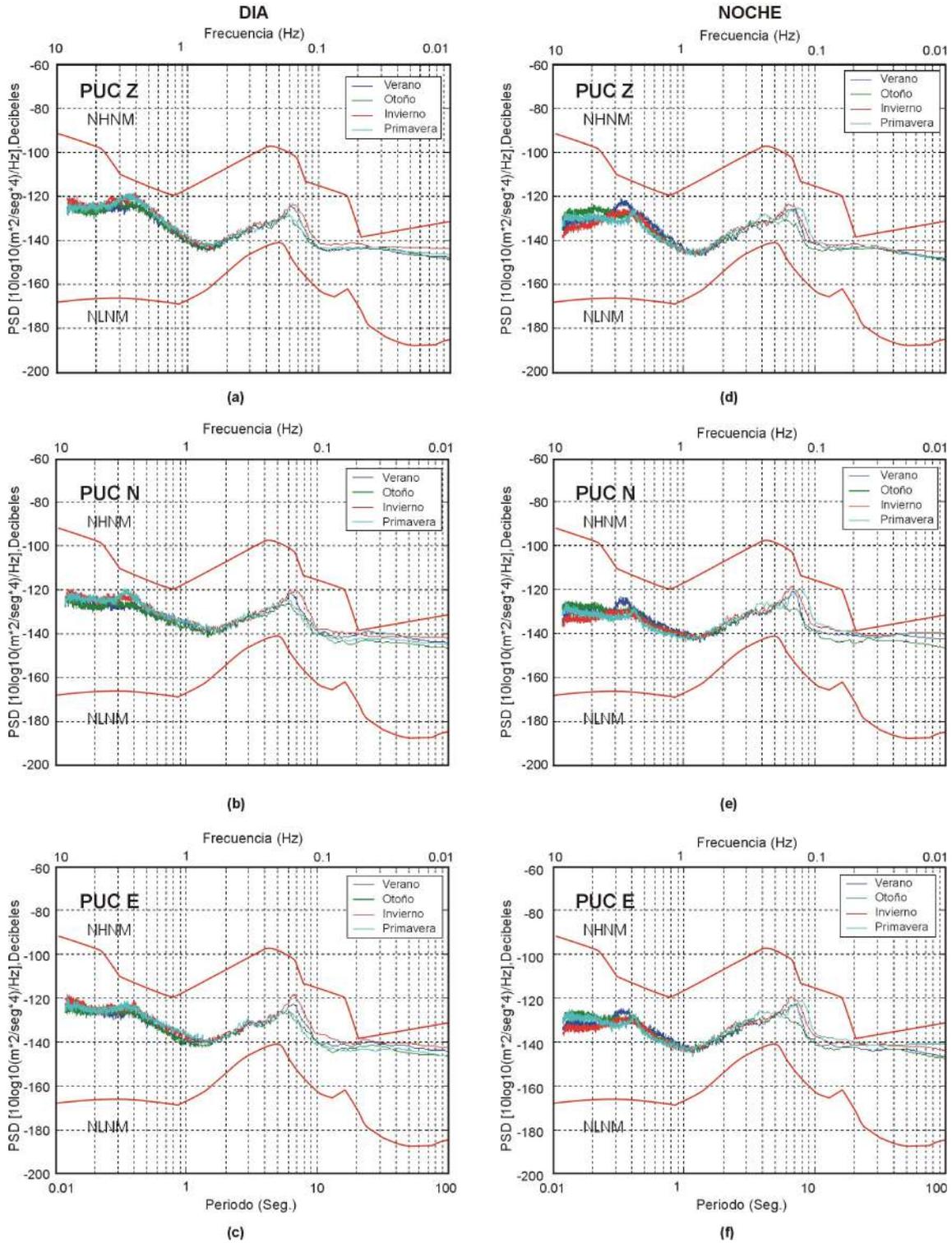


Figura 7.1.5. Variación estacional de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes (Z, N y E) de la estación PUC, para el día y la noche del año 2001. Las curvas de color rojo corresponden a las PSD NHHM y NLNM según Peterson (1993).

### 7.1.5 Variación por Componente de Registro.

Para la evaluación del ruido por componente de registro las curvas de PSD se han promediado para cada componente (N,E y Z), según la Figura 7.1.6, para el rango de las altas frecuencias (1 a 10 Hz.) se observa que la componente vertical Z es la que muestra mayor variación y amplitud en el promedio del día, producto de la presencia del ruido cultural en el día es mayor que durante la noche.

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. en donde se registran los ruidos producidos por el oleaje, se observa que las componentes horizontales N y E presentan mayor amplitud respecto a la componente vertical.

Para el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz, en donde las componentes horizontales (N y E) presentan mayores amplitudes que la vertical, posiblemente se deba a los cambios de la presión atmosférica.

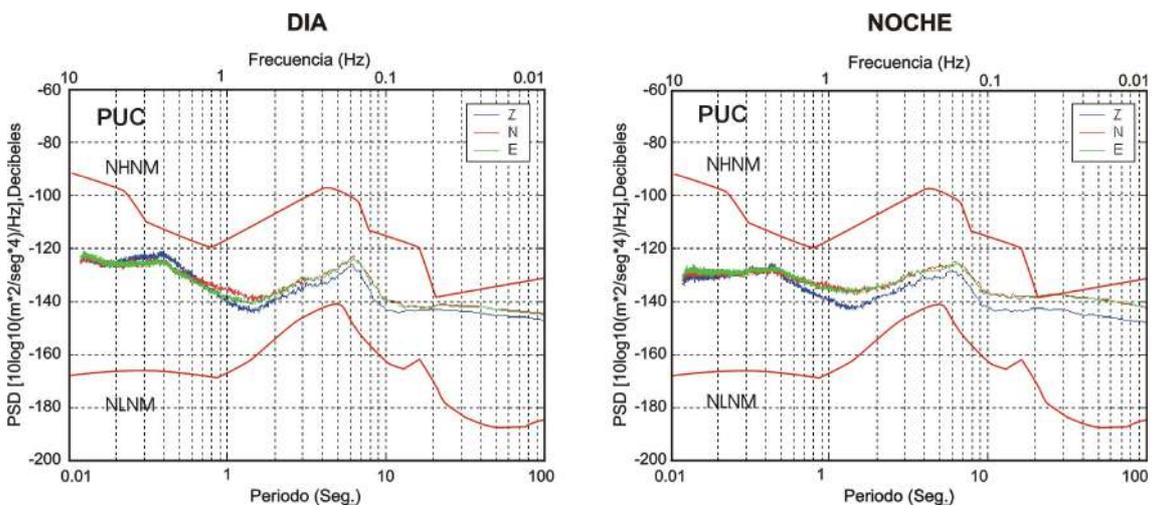
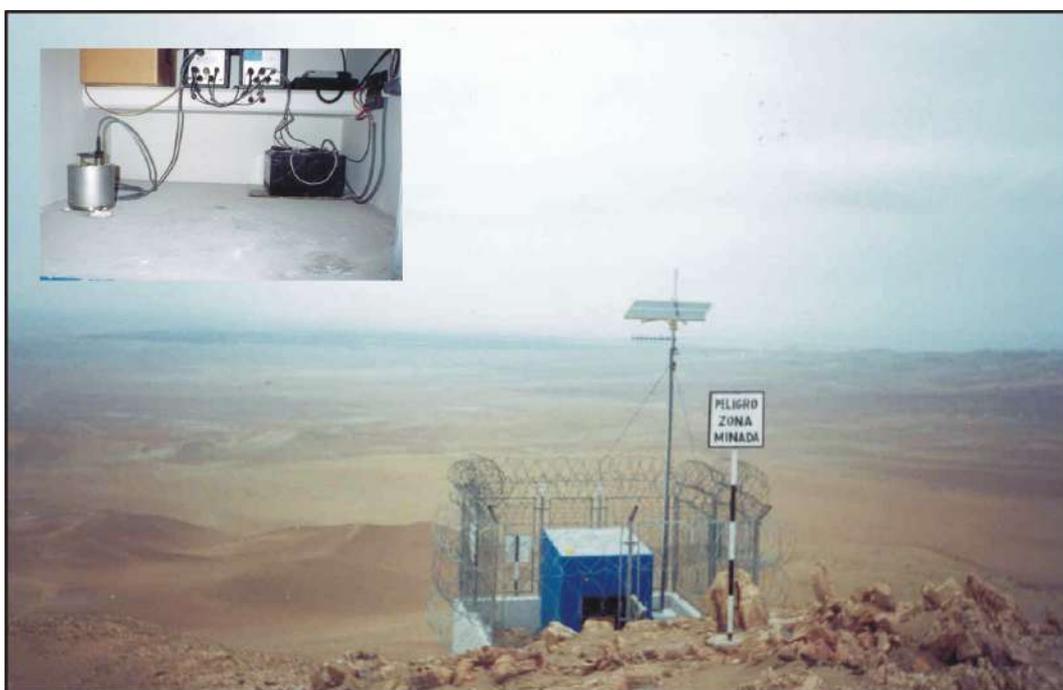


Figura 7.1.6. Promedio anual de los niveles de ruido en las tres componentes (N, E y Z), para el día y la noche de la estación PUC para el año 2001. Las curvas de color rojo corresponden a las PSD NHNM y NLNM según Peterson (1993).

## 7.2 Estación Sísmica de La Yarada (LYA).

La estación sísmica de La Yarada, fue puesta en funcionamiento en Junio de 1999 en el departamento de Tacna, a 40 Kms al Sur Oeste de la ciudad de Tacna con las siguientes coordenadas geográficas: Latitud Sur:  $18.135^{\circ}$  S, Longitud Oeste:  $70.568^{\circ}$ , Altitud: 348 m. Los instrumentos, tanto el de adquisición como el de registro se encuentran ubicados dentro de una caseta y sobre un pilar de concreto construido en roca dura, tal como se muestra en la Figura 7.2.1.



*Figura 7.2.1 Ubicación de la estación de La Yarada (LYA) obsérvese el tipo de suelo volcano sedimentario y la ubicación de la estación sobre una pequeña colina en el desierto de la Yarada – Tacna.*

### 7.2.1 Geología

Geomorfológicamente, la estación sísmica se encuentra ubicada sobre una colina de 348 m. de altitud, a 6 Km en distancia horizontal al litoral de la costa y a 8 Km del valle de Sama ubicado al Noroeste de la estación (Figura 7.2.2). En el área donde se ubica la estación sísmica, afloran formaciones volcánicas y sedimentarias con edades que corresponden al Jurásico, Terciario superior y Cuaternario. Las rocas más antiguas que se conocen en el área corresponden a la Formación volcánica

Chocolate del Liásico superior (178 m.a aprox.) y están compuestas de derrames piroclásticos de composición andesítica con escasas intercalaciones de lutitas verdes y cuarcitas grises. sobreyacendo discordantemente al Volcánico Chocolate se tiene a la formación Guaneros, compuesta de una gruesa serie de rocas de facies volcánicas y sedimentarias de edad jurasica superior (130 m.a). Encima de esta formación yacen en discordancia angular los clastos de naturaleza continental de la Formación Moquegua del terciario superior. Superiormente se encuentra la serie de tufos riolíticos de la formación Huaylillas, de edad pliocenica. Una cubierta discontinua de materiales inconsolidados de naturaleza aluvial o eólica y de grosor variable, forman los depósitos más recientes (Jaén y Ortiz, 1963).

Localmente, el tipo de roca sobre el cual se encuentra instalado el sensor sísmico es de volcano-sedimentario de la Formación Guaneros, formado por derrames y piroclastos andesíticos intercalados con areniscas y lutitas.

## **7.2.2 Clima**

El Clima de la región es de tipo desértico con escasas precipitaciones pluviales durante el invierno originado por las densas neblinas que se levantan en el litoral y se propagan hacia las zonas de las pampas. La temperatura durante los meses de Enero y Febrero son en promedio de 21 °C respectivamente y durante los meses de Julio y Agosto con un promedio de 12 °C.

En esta región, el régimen de las lluvias es el mismo que para toda la costa peruana. En Tacna el promedio anual de precipitación es 38.35 m.m. Las lluvias anuales que forman el régimen de los ríos; Sama y Caplina, desde alturas superiores a los 2,000 m. su volumen fluctúa entre 350 y 600 mm. al año. Los valores promedios de la presión atmosférica por estaciones son: en verano de 1014.8 (mb), en otoño de 1017.9 (mb), en invierno de 1019.4 (mb) y en primavera de 1016.9 (mb) datos correspondientes al año 2003.

PLANO DE UBICACION DE LA ESTACION DE LA YARADA -LYA

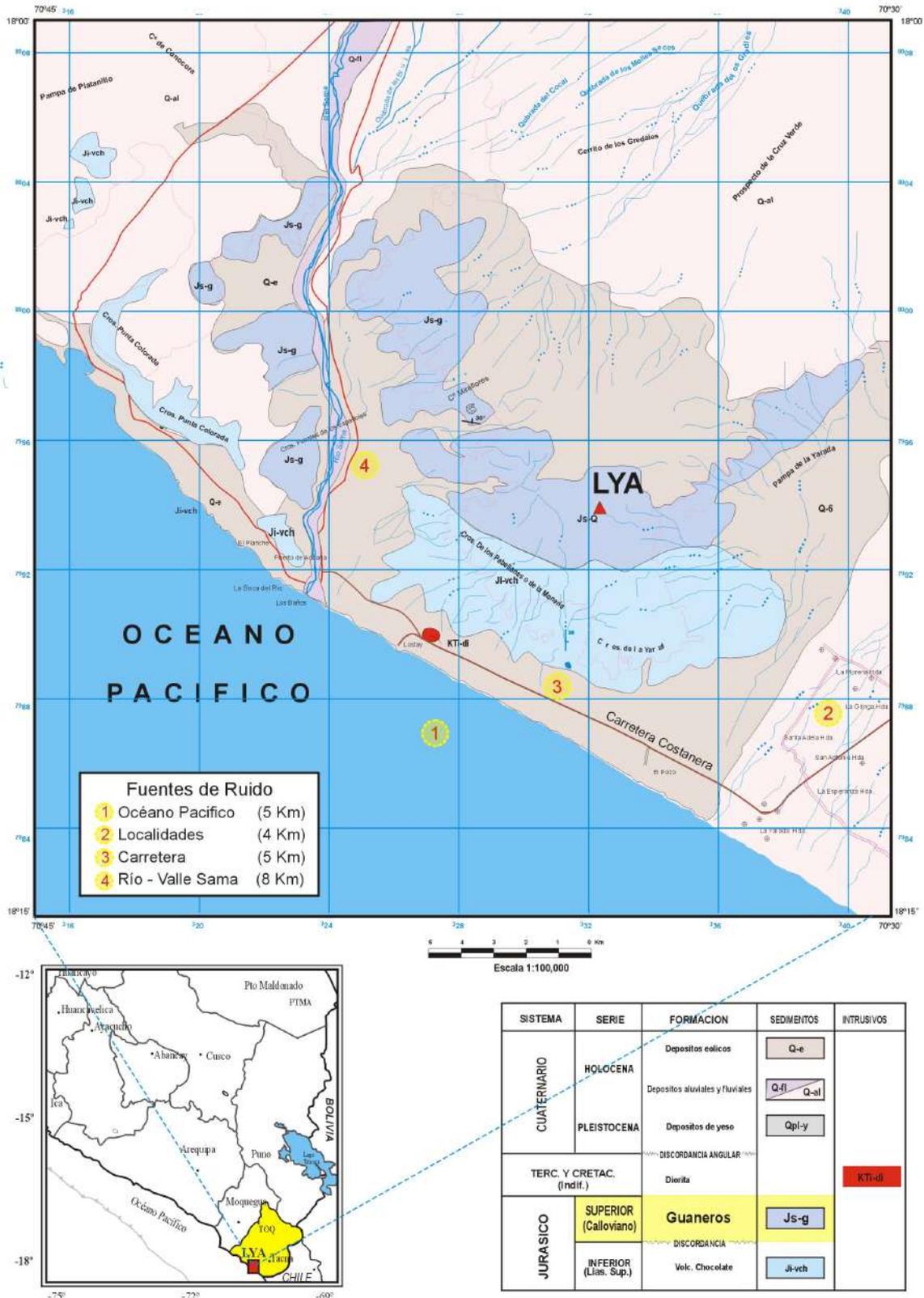


Figura 7.2.2. Plano de ubicación geográfica y geológica de la estación de La Yarada (LYA). Se muestra las posibles fuentes de ruido indicados con la numeración del 1 al 4 en el recuadro del mapa. El triangulo rojo indica la ubicación de la estación.

### 7.2.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico

Para el análisis de las variaciones diurnas del nivel de ruido se han tomado registros de una hora para la mañana (6:00 a.m.), medio día (12:00), tarde, (18:00 p.m.) y media noche (12:00 hrs.) para los días 13 de Enero, 20 de Junio, 15 de Julio y 18 de Diciembre del año 2001. Las curvas de PSD calculadas son comparadas con las definidas por Peterson (1993) y de ellos se observa lo siguiente (Figuras 7.2.3 y 7.2.4):

Para los ruidos de alta frecuencia en el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz, existen variaciones entre el día, tarde y noche con amplitudes del PSD de orden de 8 dB debido al ruido cultural producido por las actividades del hombre en las cercanías de la estación. El nivel de ruido por la mañana y en la noche es relativamente inferior a los niveles observados en otras horas del día.

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 las curvas del PSD presentan simetría con respecto a las de Peterson (1993), estando más cercanas al mínimo nivel de ruido NLNM. Sin embargo, se aprecia un fuerte incremento en la amplitud de la curva, en el rango de frecuencias de 0.1 a 0.4 Hz. siendo posible que sean debido a efectos del choque de las olas del mar con el litoral de la costa.

Para el rango de frecuencias entre 0.01 a 0.1 Hz., las curvas del PSD, presentan mayores amplitudes en las componentes horizontales (N y E), lo cual sugiere que el sensor es fuertemente afectado por la presión atmosférica, esto probablemente a que la estación se encuentra cerca de la superficie en un cerro de roca volcano-sedimentaria. El incremento del ruido es mayor en las componentes horizontales prácticamente superan el rango máximo establecido por Peterson (1993).

## VARIACION DIURNA

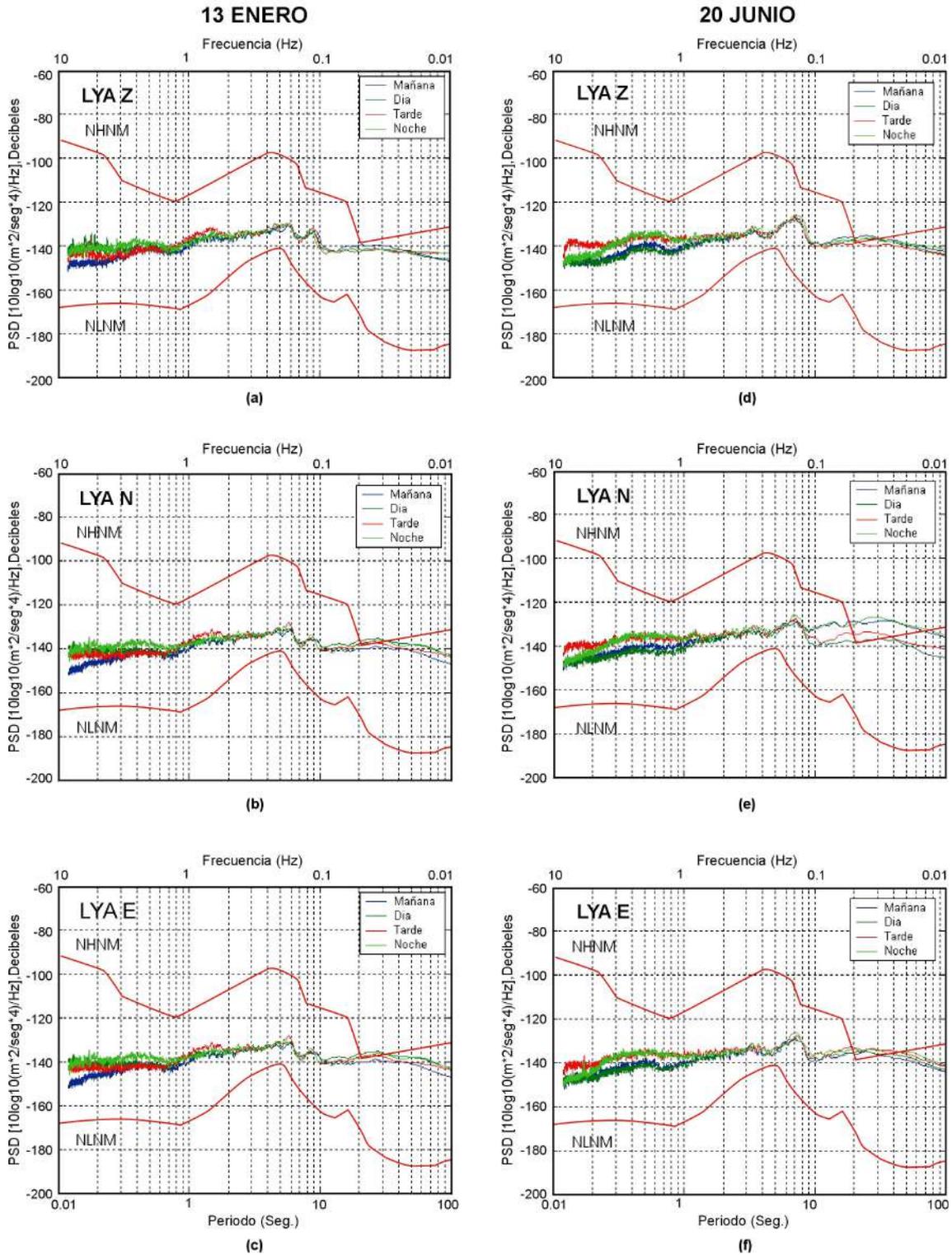


Figura 7.2.3. Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes de la estación LYA para un día de los meses de Enero y Junio del Año 2003. Las curvas de color rojo corresponden a las PSD NHHM y NLNM según Peterson (1993).

## VARIACION DIURNA

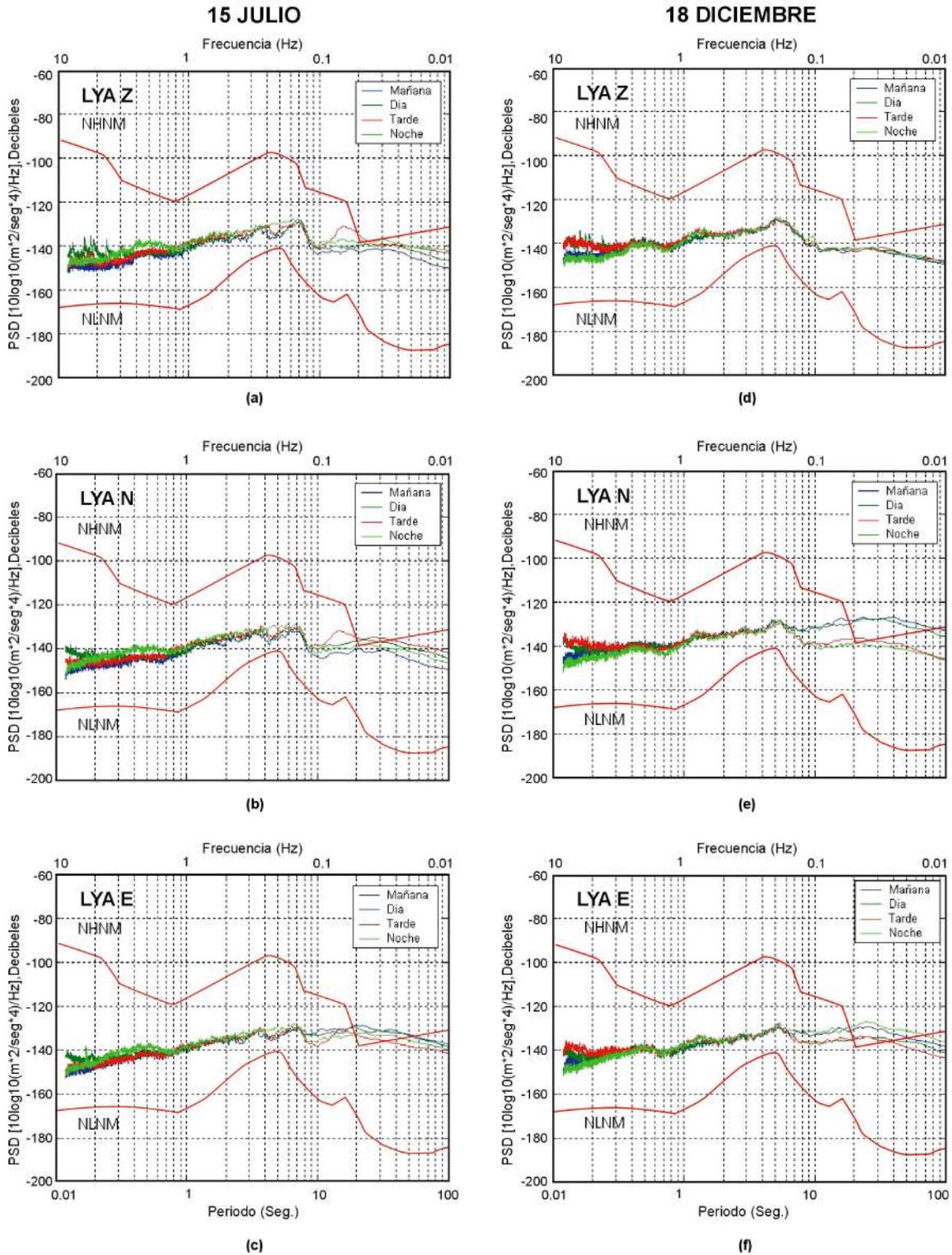


Figura 7.2.4 Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación LYA para un día de los meses de Julio y Diciembre del año 2003. Las curvas de color rojo corresponden a las PSD NHHM y NLNM según Peterson (1993).

### 7.2.3 Variación Estacional de los Niveles de Ruido

A continuación se procede a analizar las variaciones de los niveles de ruido con respecto a los cambios estacionales durante el año (Figura 7.2.5). Para las altas frecuencias ( $>1$  Hz.) se observa que las estaciones de verano e invierno muestran ligeros incrementos con variaciones del orden de 7 a 10 dB. en las amplitudes de los niveles ruido, en verano posiblemente se deba al incremento del caudal del río Sama por las lluvias en la sierra de Tacna y en Invierno sería debido al incremento del viento en el área y los efectos de este produce al impactar en la topografía de las laderas del cerro sobre la que se encuentra la estación LYA, incrementando el nivel de ruido en las altas frecuencias ( $> 4$  Hz.)

Para el rango de frecuencias de 0.09 a 1 Hz. se observa que los niveles de ruido en Otoño e Invierno presentan mayores incrementos en sus amplitudes, esto sería debido a que en esta época del año se incrementan el número de tormentas y vientos en el océano Pacífico Sur influenciados por la presencia del Anticiclón del Pacífico Sur. Así mismo, en el rango de frecuencias de 0.09 a 0.1 Hz. los niveles de son altos durante todo el año, lo cual sería posible debido a que en esta banda de frecuencias se registrarían los ruidos producidos por el choque de las olas con el litoral de la costa y la estación se ubica muy cerca del océano pacífico por lo que sería principalmente afectada por este tipo de fuente de ruido natural.

En las bajas frecuencias ( $<0.09$  Hz), las amplitudes son mayores en el invierno y otoño más notorios en las componentes horizontales que prácticamente sobrepasan el nivel máximo propuesto por Peterson (1993). Tal como se dijo, estos valores podrían deberse porque al encontrarse la estación sísmica LYA sobre un cerro y cerca de la superficie, los efectos de la presión atmosférica son mayores.

## VARIACION ESTACIONAL

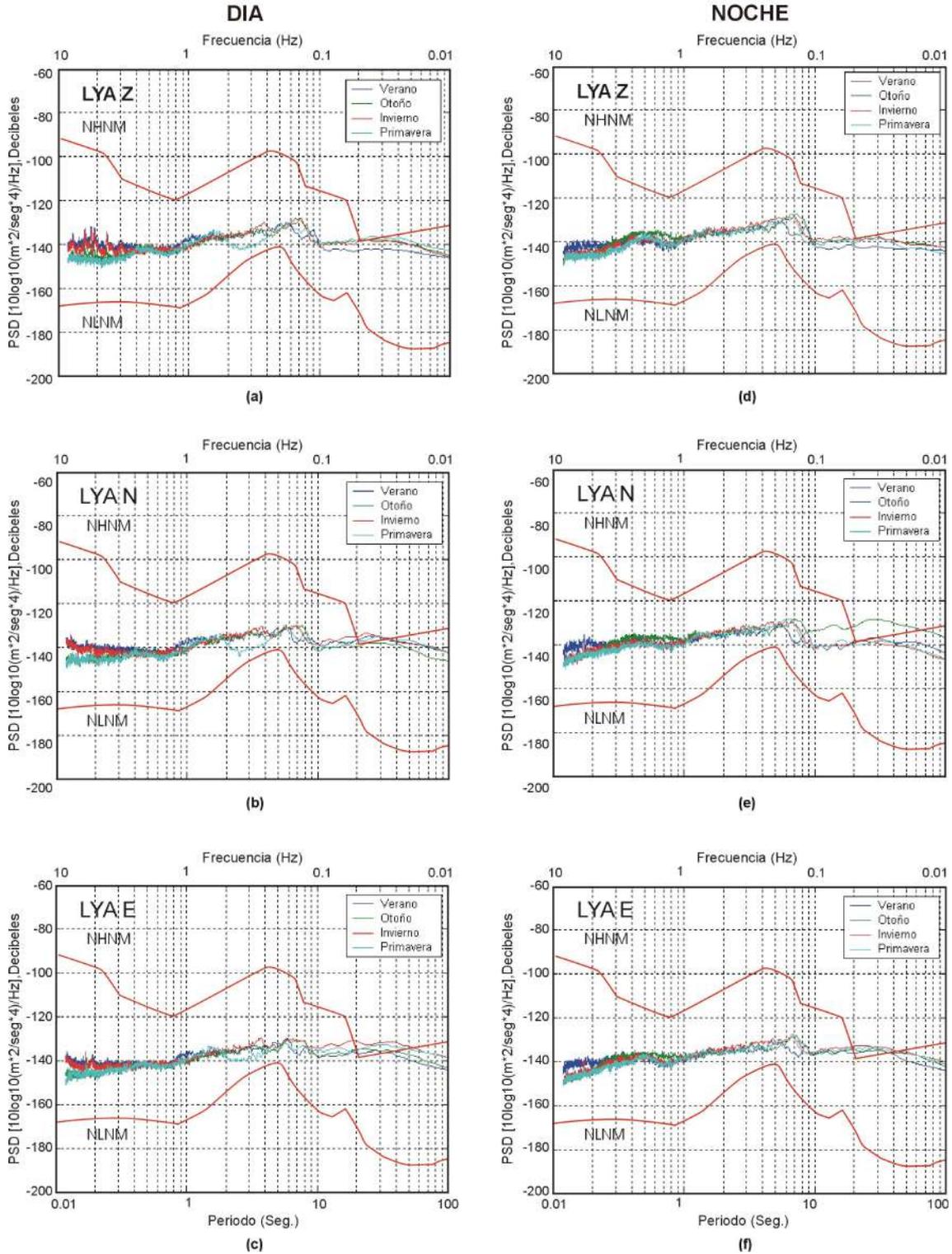


Figura 7.2.5. Variación estacional de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes N,E y Z, de la estación LYA para el día y la noche del Año. 2003. Las curvas rojas corresponden a los PSD (NHHM) y (NLNM) según Peterson (1993).

## 7.2.4 Variación por Componente de Registro.

Las curvas de PSD para cada componente (Z, N y E), se obtienen del promedio anual de cada una de ellas y los resultados se muestran en la Figura 7.2.6. En general, se observa que para las frecuencias de 1 a 10 Hz. no hay variación significativa del nivel de ruido en las tres componentes, tanto para el día como para la noche; sin embargo, para el nivel de ruidos de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. en las componentes horizontales (N y E) se incrementa su amplitud en un orden de 7 a 8 dB. lo que probablemente se deba a que el sensor sísmico de la estación se encuentra ubicado en la superficie del terreno y sobre roca dura, expuesto a los efectos de las fluctuaciones de la presión atmosférica.

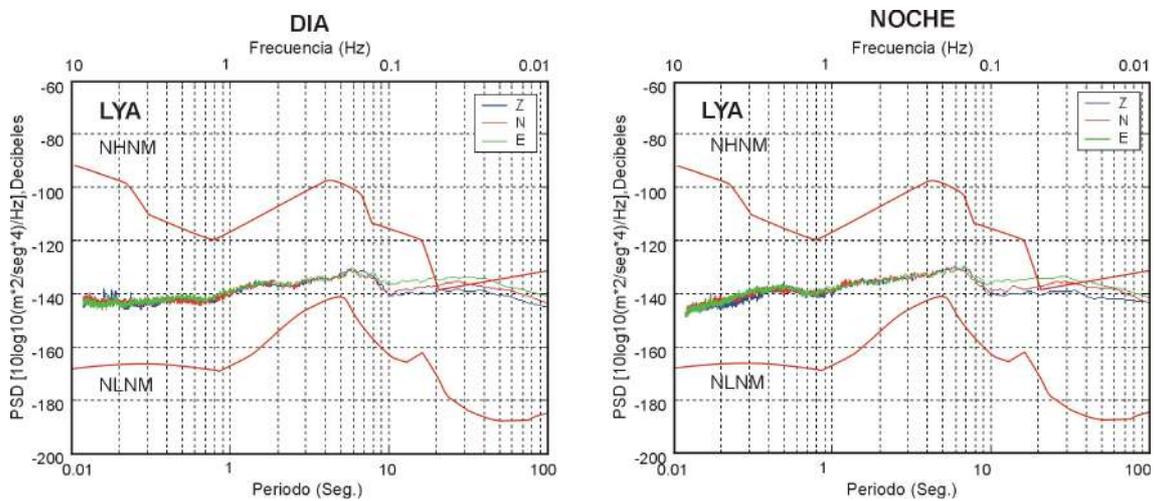
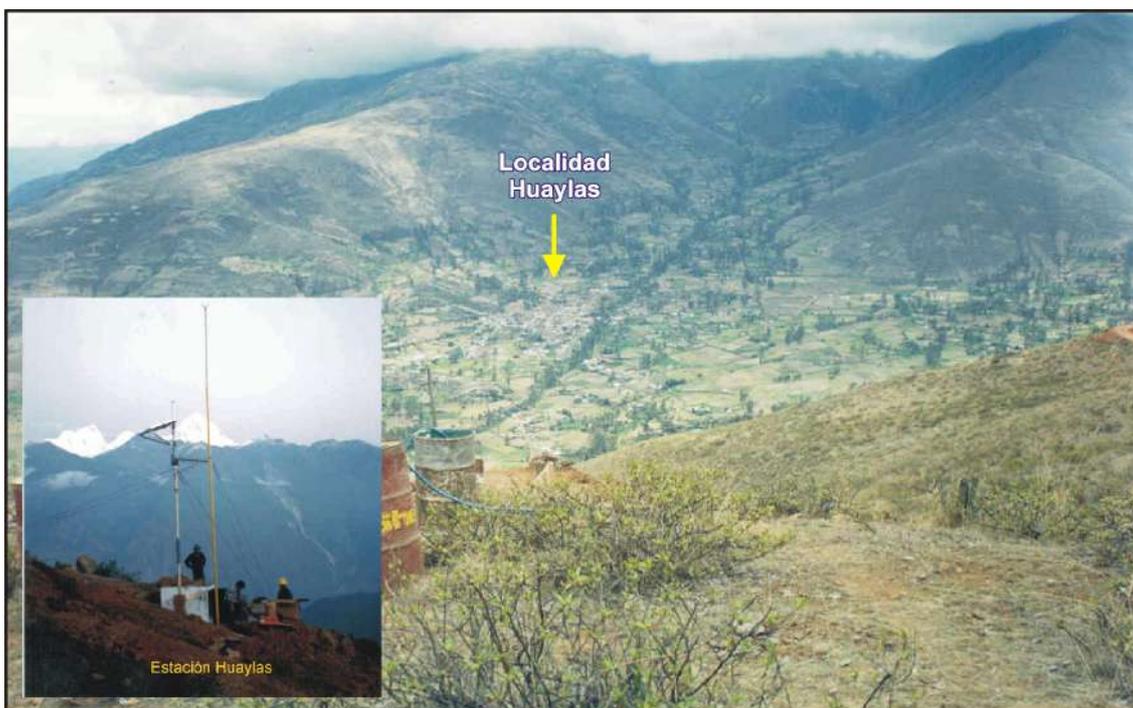


Figura 7.2.6. Promedio Anual de los niveles de ruido presente en las tres componentes (N, E y Z) de la estación LYA. Las curvas de PSD corresponden al promedio obtenido para el día y la noche del año 2001.

### 7.3 Estación Sísmica de Huaylas (YLA)

La estación sísmica de Huaylas (YLA) fue puesta en funcionamiento en Junio de 1999 en el Departamento de Ancash, al Noroeste de Huaraz y a 3 Km. de la localidad de Huaylas con las siguientes coordenadas geográficas: Latitud Sur: 08.847 °, Longitud Oeste: 77.889 °, Altitud: 3230 msnm. Los instrumentos, tanto el sensor como el registrador se encuentran ubicados sobre un pilar de concreto construido en roca dura, dentro de una caseta y sobre la superficie del terreno, tal como se muestra en la Figura 7.3.1.



*Figura 7.3.1 En la imagen se muestra la ubicación de la estación YLA en los alrededores de la localidad de Huaylas. Obsérvese que la estación se encuentra sobre la superficie.*

#### 7.3.1 Geología

El área donde se encuentra ubicada la estación sísmica YLA (Figura 7.3.2), presenta una geomorfología de cordillera, caracterizada por la presencia de nevados que alcanzan alturas promedio de 4,000 m.s.n.m. y disectadas por valles bastante profundos que fluyen hacia el río Santa (Reyes, 1995).

Localmente la estación sísmica de YLA se encuentra ubicada sobre roca dura de la Formación Chimu perteneciente al grupo Goyllarisquizga. Las capas superficiales están constituidas principalmente por cuarcitas, areniscas y arcilitas con mantos de carbon (antracita), sobreyacendo a la formación Oyon (Neocomiano inferior) e infrayacendo a la formación Santa (Valanginiano superior) con ligera discordancia.

### **7.3.2 Clima**

El tipo de clima que se presenta en la región es variado, desde el templado cálido y subtropical en el litoral costero, hasta el clima polar en las áreas de los nevados y glaciares de la Cordillera Blanca con temperaturas medias anuales que varían desde 24°C hasta 0°C respectivamente. A alturas promedio de 1,700 a 2900 m.s.n.m., las temperaturas varían entre 12° C a 22° C. y es en este piso climático en donde se encuentra ubicada la localidad de Huaylas (2600 m.s.n.m.). El clima que soporta la estación sísmica YLA, se presenta desde de los 3,000 a 3,800 m.s.n.m. siendo templado – frío con temperaturas medias que varían desde los 10°C hasta 18°C; mientras que, en la época invernal la temperatura desciende hasta los 0°C. El clima boreal que caracteriza a la Puna (3,800 a 4,800 m.s.n.m.), presenta niveles extremos de frigidez con temperaturas medias anuales que varían de 1°C a 5°C

### **7.3.3 Variación Diurna de los Niveles del Ruido Sísmico**

Para el análisis de las variaciones diurnas del nivel de ruido se han tomado registros de una hora para la mañana (6:00 a.m.), medio día (12:00), tarde, (18:00 p.m.) y media noche (12:00 hrs.). Para los días 06 de Enero, 20 de Mayo, 26 de Agosto y 15 de Noviembre del año 2003. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 7.2.3 y 7.2.4. De acuerdo a las figuras, para el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz. existen variaciones diurnas con incrementos en sus amplitudes de 6 a 7 dB, siendo mayor durante las horas del día.

En el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. los niveles de ruidos no presentan variaciones importantes estando próximas al nivel mínimo propuesta por Peterson (1993). Para frecuencias que van 0.01 a 0.1 Hz, las amplitudes del ruido sobrepasan el nivel máximo propuestos por Peterson (1993), siendo mayor en las componentes horizontales lo cual se debería a efectos de la presión atmosférica por encontrarse la estación a mayor altura y sobre la superficie.

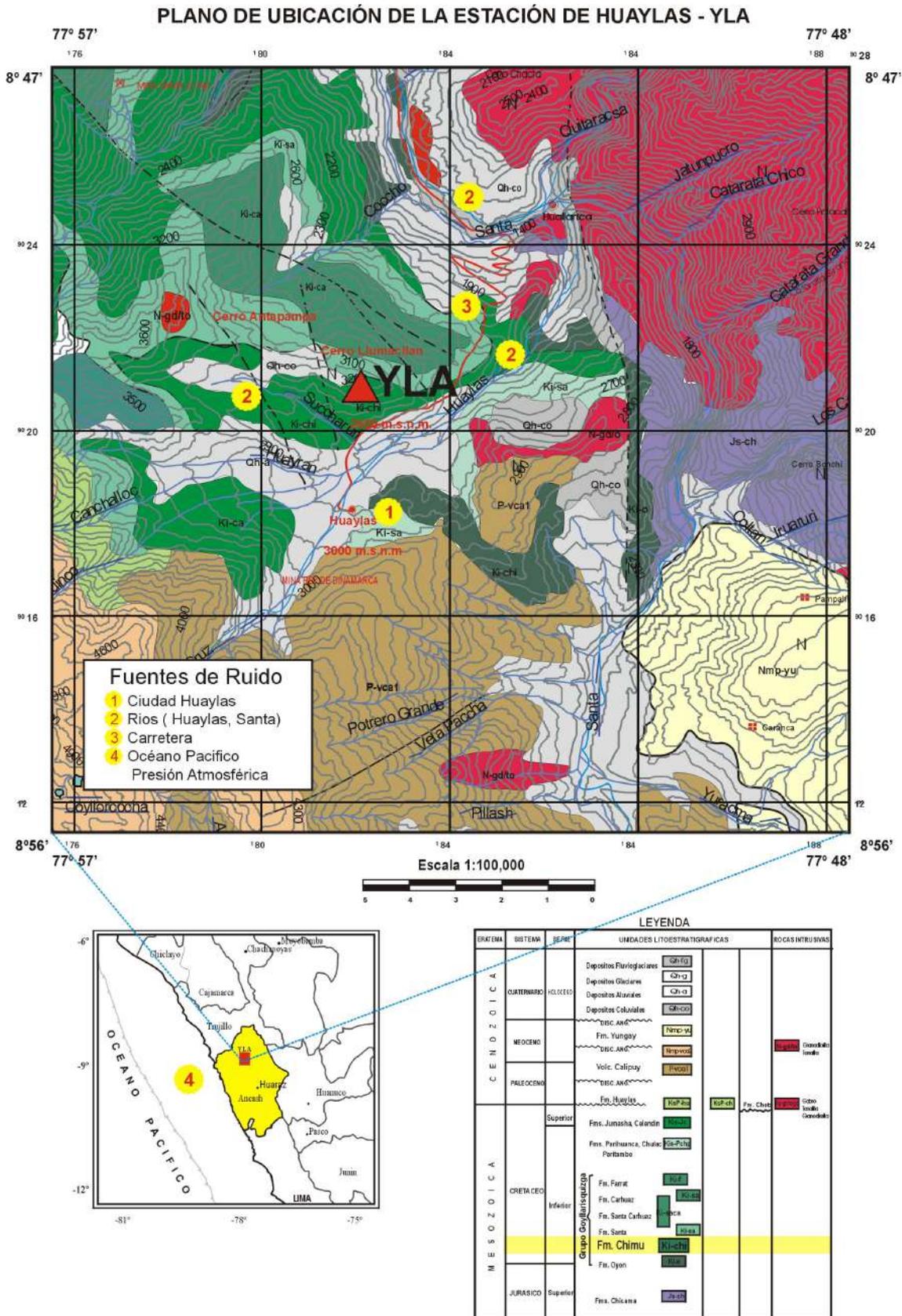


Figura 7.3.2 Plano de localización geográfica y geológica de la estación de La Huaylas (YLA). Se muestra las fuentes de ruido indicadas con la numeración del 1 al 4 en el recuadro del mapa, el triangulo rojo indica la ubicación de la estación.

## VARIACION DIURNA

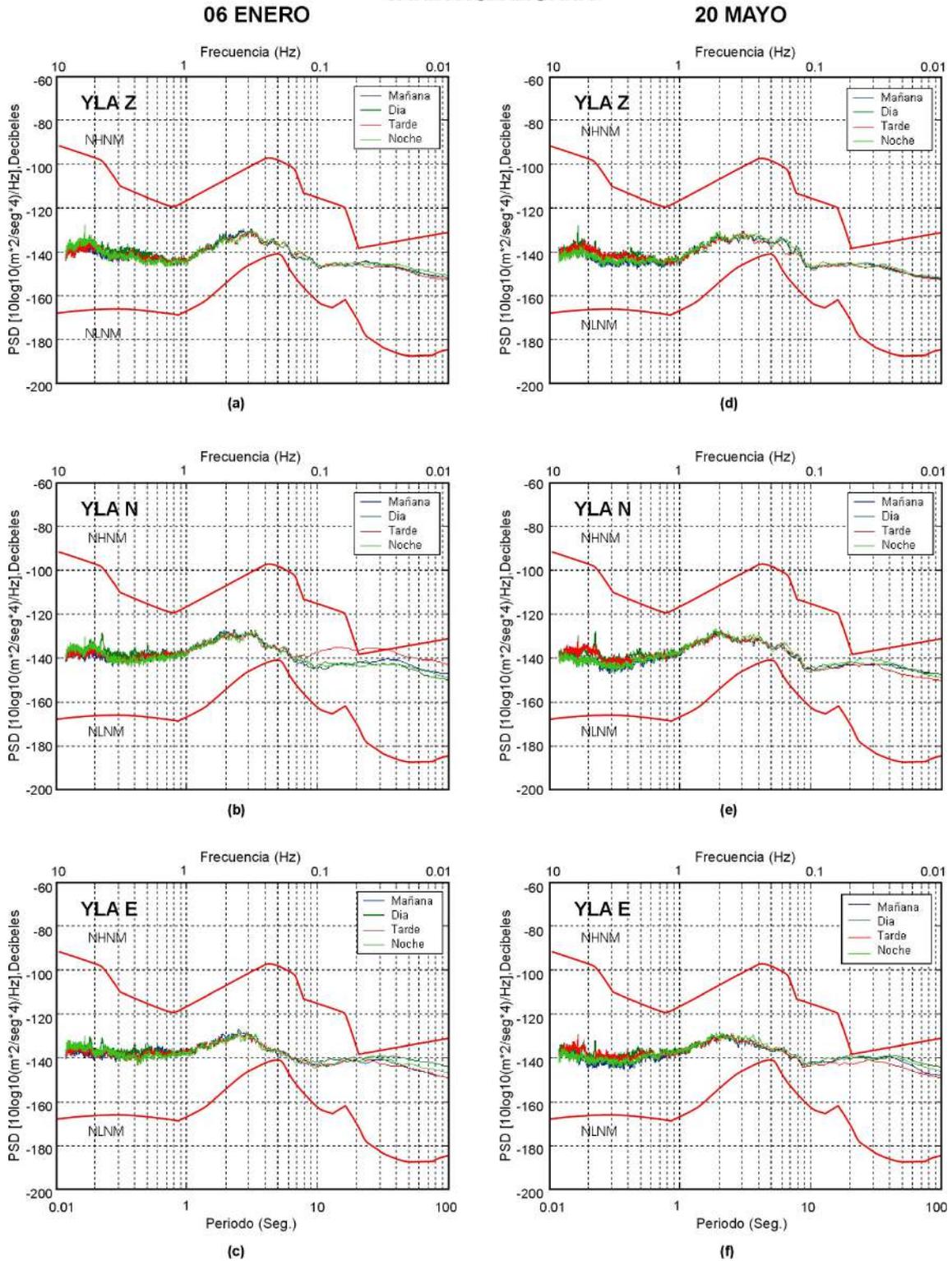


Figura 7.3.3. Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación YLA para un día de los meses de Enero y Junio del Año 2003. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHNM y NLNM según Peterson (1993).

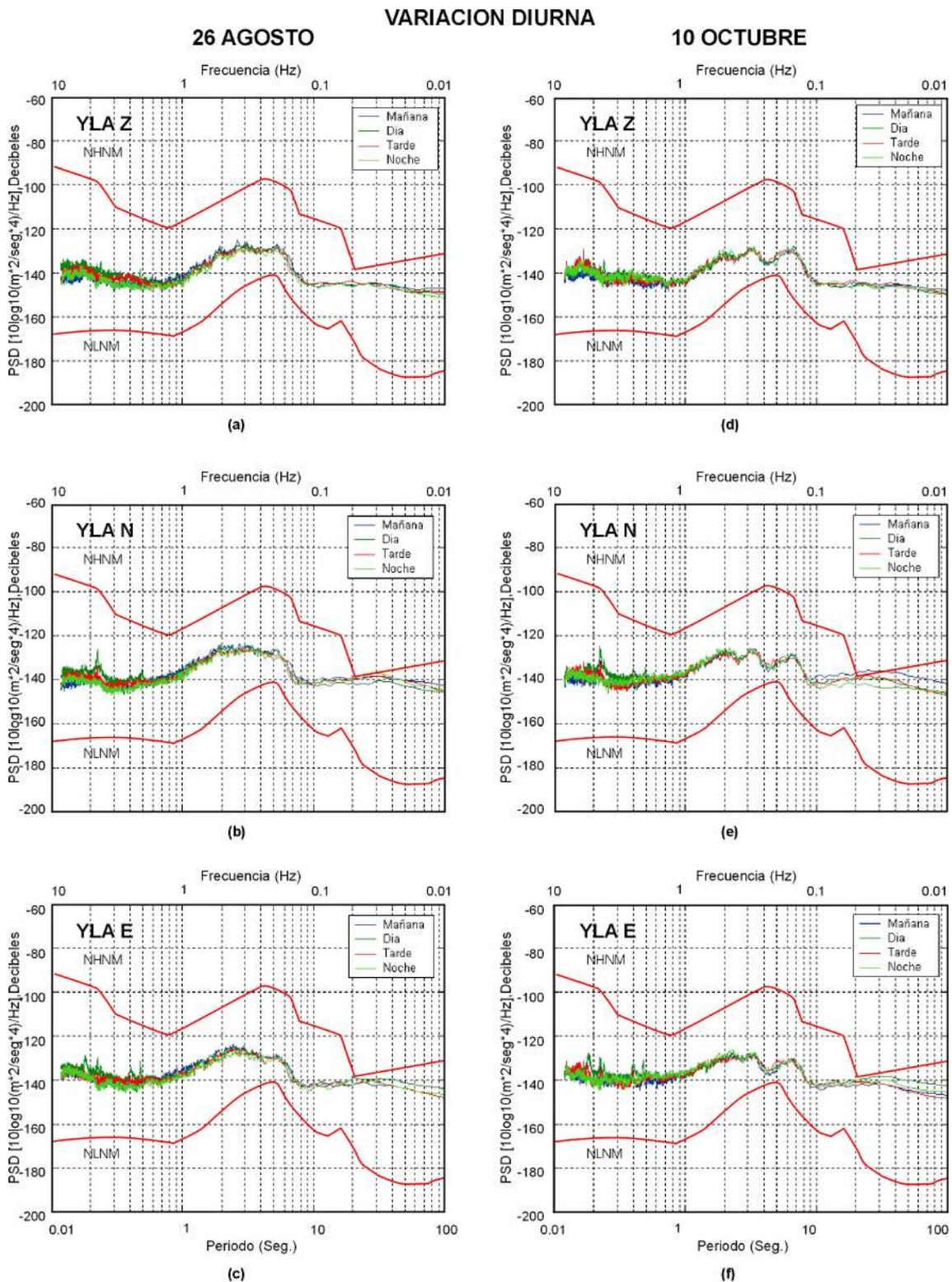


Figura 7.3.4 Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación YLA para un día de los meses de Agosto y Octubre del año 2003. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHNM y NLNM según Peterson (1993).

### **7.3.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico.**

Los niveles de ruido y su variación promedio anual por estaciones del año son evaluados para cada componente y sus resultados sugieren que para el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz las curvas del nivel de ruido mantienen la misma simetría durante todo el año con ligeras variaciones de mayor amplitud durante la estación de Primavera y Verano, posiblemente por el incremento de las lluvias en esta época del año.

En el rango de frecuencias de 0.3 a 0.9 Hz, las curvas de PSD presentan grandes variaciones durante el invierno y primavera, lo cual podría deberse al incremento de los vientos y las tormentas en el Océano Pacífico ocasionados por el anticiclón de Pacífico Sur.

En los rangos de frecuencia de 0.09 a 0.3 Hz. se observa un pico de ruido que podría deberse a la ocurrencia de tormentas oceánicas y cuyas olas golpean la costa con mayor fuerza y producen una transferencia directa de su energía a través del acoplamiento entre las ondas y la batimetría. Estos ruidos se presentan con mayor amplitud durante la Primavera.

Las curvas de PSD's para las componentes horizontales (N y E), entre las frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. presentan un incremento de 7 a 8 dB por encima de los niveles máximos propuestos por Peterson (1993), lo cual se debe a que la estación se encuentra expuesta a los efectos de la presión atmosférica ya que la estación está a mayor altura y en superficie.

## VARIACION ESTACIONAL

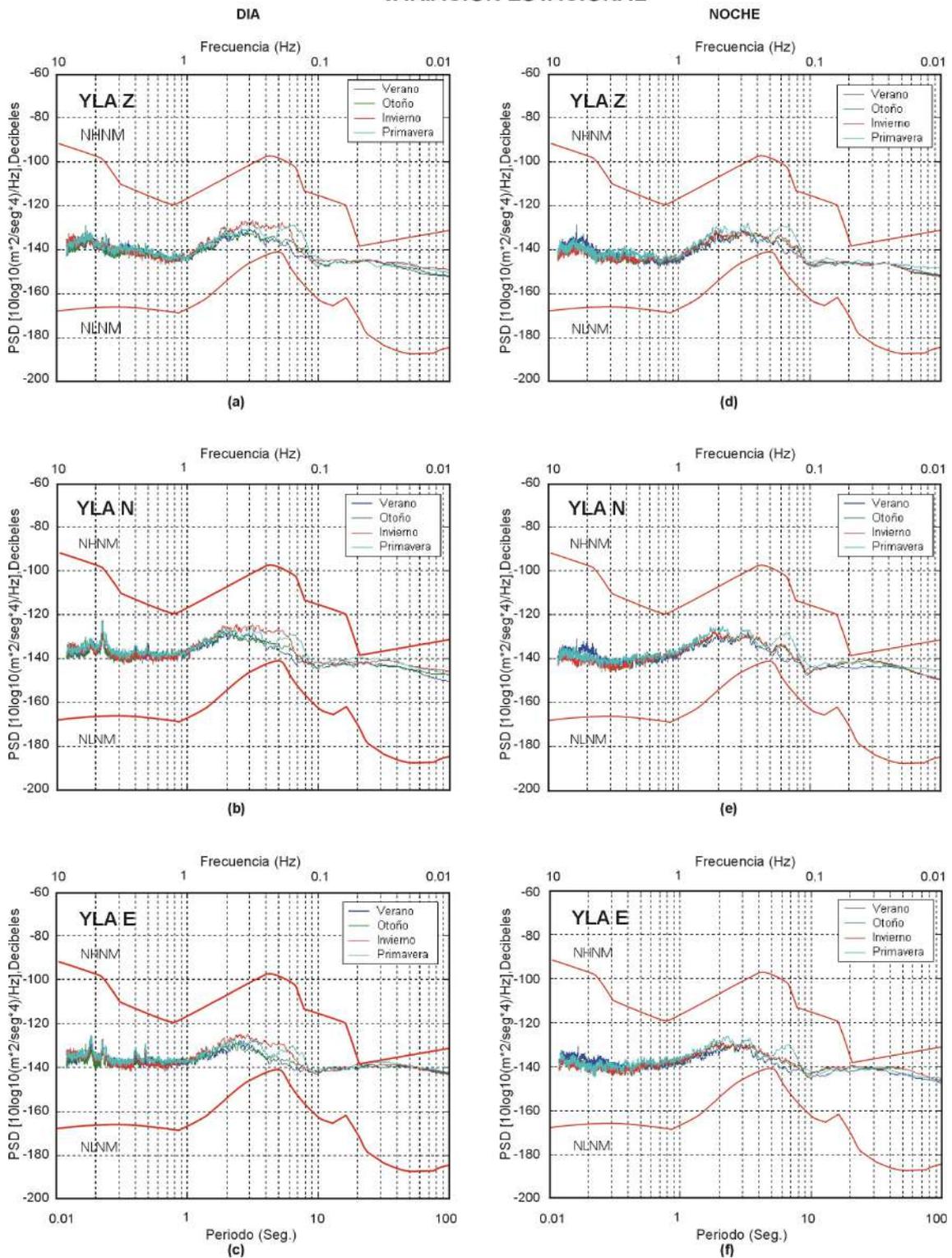


Figura 7.3.4. Variación estacional de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes N,E y Z de la estación YLA para el Día y la Noche del Año 2003. Las curvas rojas corresponden a los niveles NHNM y NLNM según Peterson (1993).

### 7.3.5 Variación por Componente de Registro

Del análisis de la Figura 7.3.5, se puede observar que para ruidos en el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz. la componente Z la que presenta menor nivel de ruido en el rango de frecuencias de 1 a 6 Hz. Sin embargo, para frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz, las componentes horizontales son las que se presentan mayor nivel de ruido en el orden de 7 dB cercanas a la curva de alto nivel de ruido propuesta por Peterson (1993), como ya se dijo se debe a efectos de la presión atmosférica.

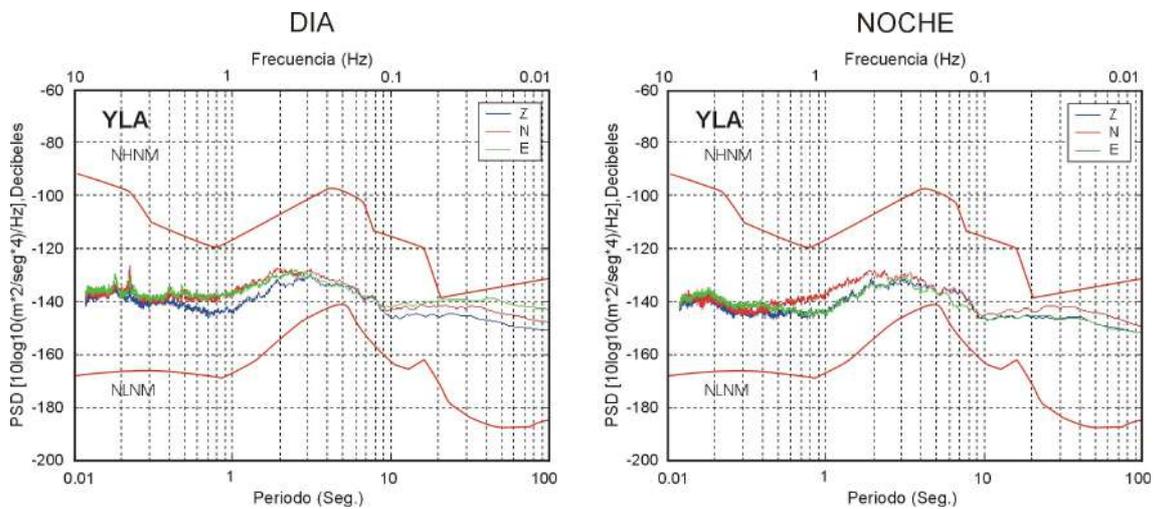
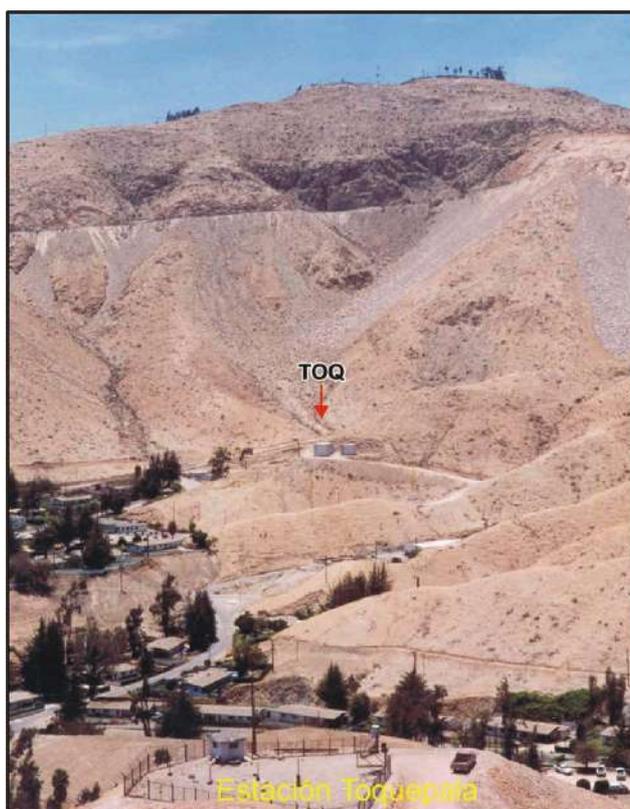


Figura 7.3.5. Promedio anual de los niveles de ruido presente en las componentes (N, E y Z) de la estación YLA. Las curvas de PSD corresponden al promedio obtenido para el día y la noche del año 2003.

#### 7.4 Estación Sísmica de Toquepala (TOQ).

La estación sísmica de Toquepala fue puesta en funcionamiento en Junio de 1997 en el Departamento de Moquegua, a 12 Km al Oeste de la localidad de Toquepala con las siguientes coordenadas geográficas: Latitud Sur: 17.307°, Longitud Oeste: 70.643 °, Altitud: 2586 m.s.n.m. Los instrumentos, tanto el de adquisición como el de registro, se encuentran ubicados dentro de una caseta y sobre un pilar de concreto construido en la superficie del terreno, tal como se muestra en la Figura 7.4.1



*Figura 7.4.1 La imagen muestra la posición de la caseta de la estación sísmica TOQ respecto al tipo de suelo sobre la cual se encuentra instalada.*

##### 7.4.1 Geología

En el área de estudio afloran rocas de la Formación Moquegua con conglomerados y areniscas intercalados con tufos y areniscas tufáceas que pertenecen al Plioceno Superior (Figura 7.4.2). La formación Moquegua, que fundamentalmente constituye la llanura costanera, es el resultado de relleno de una cuenca longitudinal existente entre la cadena costanera y el pie de los andes. La

Formación Moquegua se encuentra fuertemente erosionada y presenta cañones quebradas profundas y secas que corren en dirección SO. La Formación Toquepala se compone en su mayoría de derrames, brechas de flujos piroclásticos de composición andesítica, dacítica y riolítica de color gris verdoso, pardo y violeta. También se encuentran afloramientos de rocas intrusivas del Terciario inferior que consisten en dioritas, granodiorita y granitos. Además gran parte del área esta cubierta por depósitos aluviales y morrenicos del cuaternario (Bellido, 1979). Localmente el sensor sísmico de la estación se encuentra instalada sobre rocas volcánicas de composición andesítica, dacítica y riolítica de la serie Toquepala (Cretaceo).

#### **7.4.2 Clima**

La región presenta un clima típico de sierra, siendo frío y seco con temperaturas que oscilan entre los 9 y 18 grados. Esta región presenta valles y quebradas de tierras fértiles, o cañones fluviales. La estación sísmica soporta el clima típico de un valle de sierra. Los valores promedios de la presión atmosférica por estaciones son: en Verano de 1014.8 (mb), en otoño de 1017.9 (mb), en Invierno de 1019.4 (mb) y en primavera de 1016.9 (mb) todas para el año 2003.

#### **7.4.3 Variación Diurna de los Niveles del Ruido Sísmico.**

Para el análisis de las variaciones diurnas del nivel de ruido se han tomado registros de una hora para la mañana (6:00 a.m.), medio día (12:00), tarde (18:00 p.m.) y media noche (12:00) para los días 02 de Febrero, 10 de Abril, 21 de Agosto y 18 de Diciembre del año 2003. Los resultados se presentan en las Figuras 7.5.3 y 7.5.4. Las curvas de PSD muestran que para el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz (componente vertical Z) la variación diurna es relativamente baja y solo se dan algunos ligeros incrementos con amplitudes del orden de 3 a 4 dB. El pico de frecuencias en el rango de 9 a 10 Hz. posiblemente sea producto del ruido producido por la actividad humana. Así mismo, en el rango de frecuencias de 5 Hz se observa un pico bien pronunciado y tendría su origen en las explosiones que se realizan en la mina Toquepala.

Par el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz, la curva de ruido se encuentra próximo al nivel mínimo establecido por Peterson (1993) sin mostrar anomalía alguna.

PLANO DE UBICACION DE LA ESTACION DE TOQUEPALA-TOQ

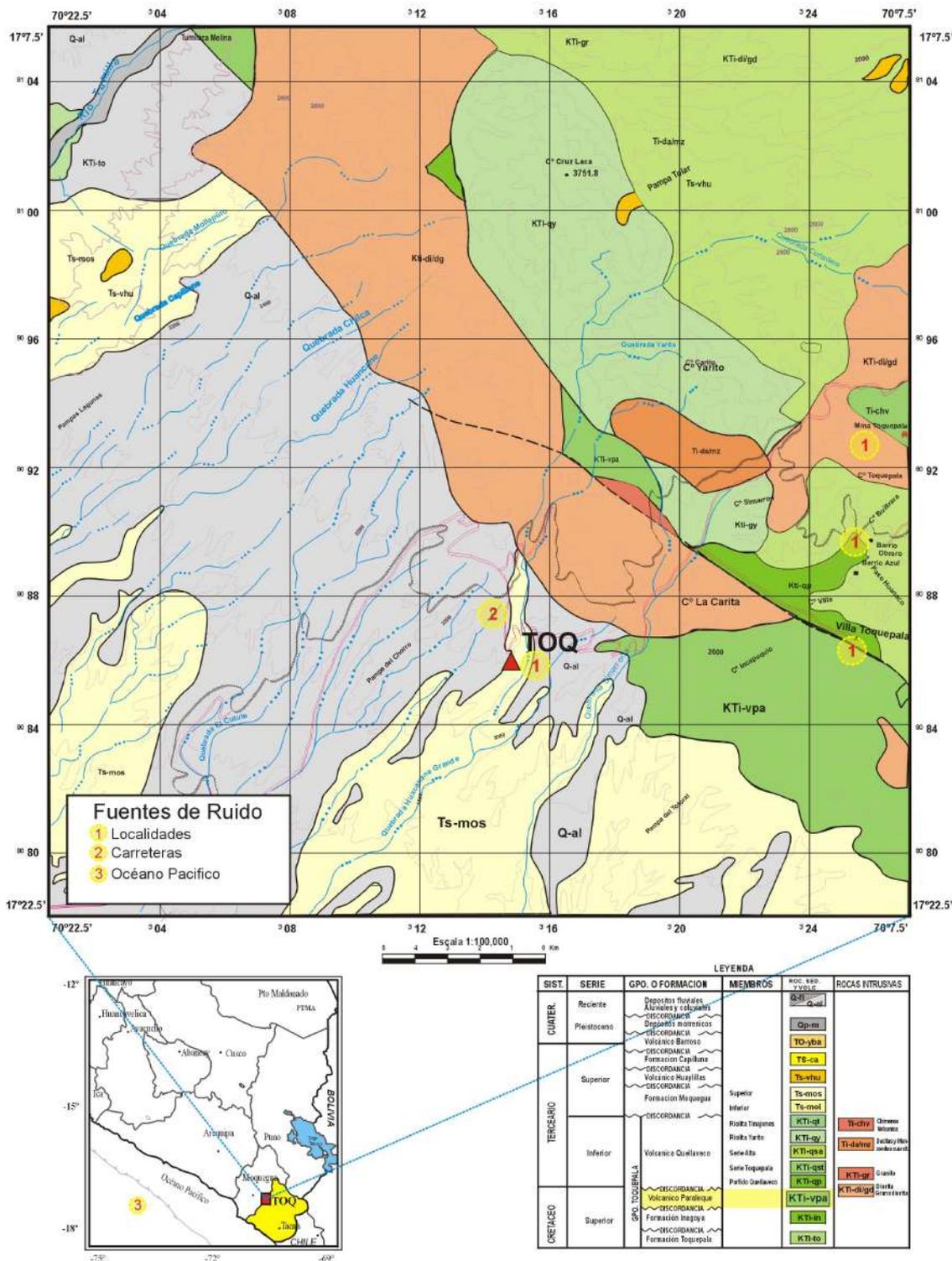


Figura 7.4.2. Plano de Localización geográfica y geológica de la estación de Toquepala (TOQ). Se muestra la posición de la estación respecto a las principales fuentes de ruido numeradas en círculos del 1 al 3. El triangulo rojo indica la ubicación de la estación TOQ.

Para bajas frecuencias ( $<0.1$  Hz) el nivel de ruido se encuentra por encima de la curva de máximo nivel de ruido definido por Peterson (1993), lo cual se debería a que la estación, al estar en superficie, soporta los efectos de la presión atmosférica. Este nivel de ruido tiene incrementos de 3 a 5 dB durante las mañanas.

#### **7.4.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico**

A continuación se procede a analizar las variaciones de los niveles de ruido con respecto a los cambios estacionales durante el año (Figura 7.5.5). Se ha considerado comparar los niveles de ruido para las horas más ruidosas del día y la noche para el año 2003.

Para el rango de frecuencias entre 1 a 10 Hz. se observan pequeñas variaciones en la amplitud a razón de 4 a 5 dB, estas variaciones se deben probablemente por el efecto del ruido producido por las actividades del hombre. En el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. las estaciones de Invierno y Primavera presentan algunos incrementos en el nivel de ruido y esta podría deberse a que en estas épocas se incrementan las tormentas y los vientos en el pacífico influenciadas por el anticiclón del Pacífico Sur. Para el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. el nivel de ruido se mantiene estable durante todo el año, pero próximo al máximo nivel (NHNM) indicado por Peterson (1993), esto se debe principalmente a que la estación se encuentra en la superficie del terreno y el sensor es afectado por las fluctuaciones locales de la presión atmosférica.

VARIACION DIURNA

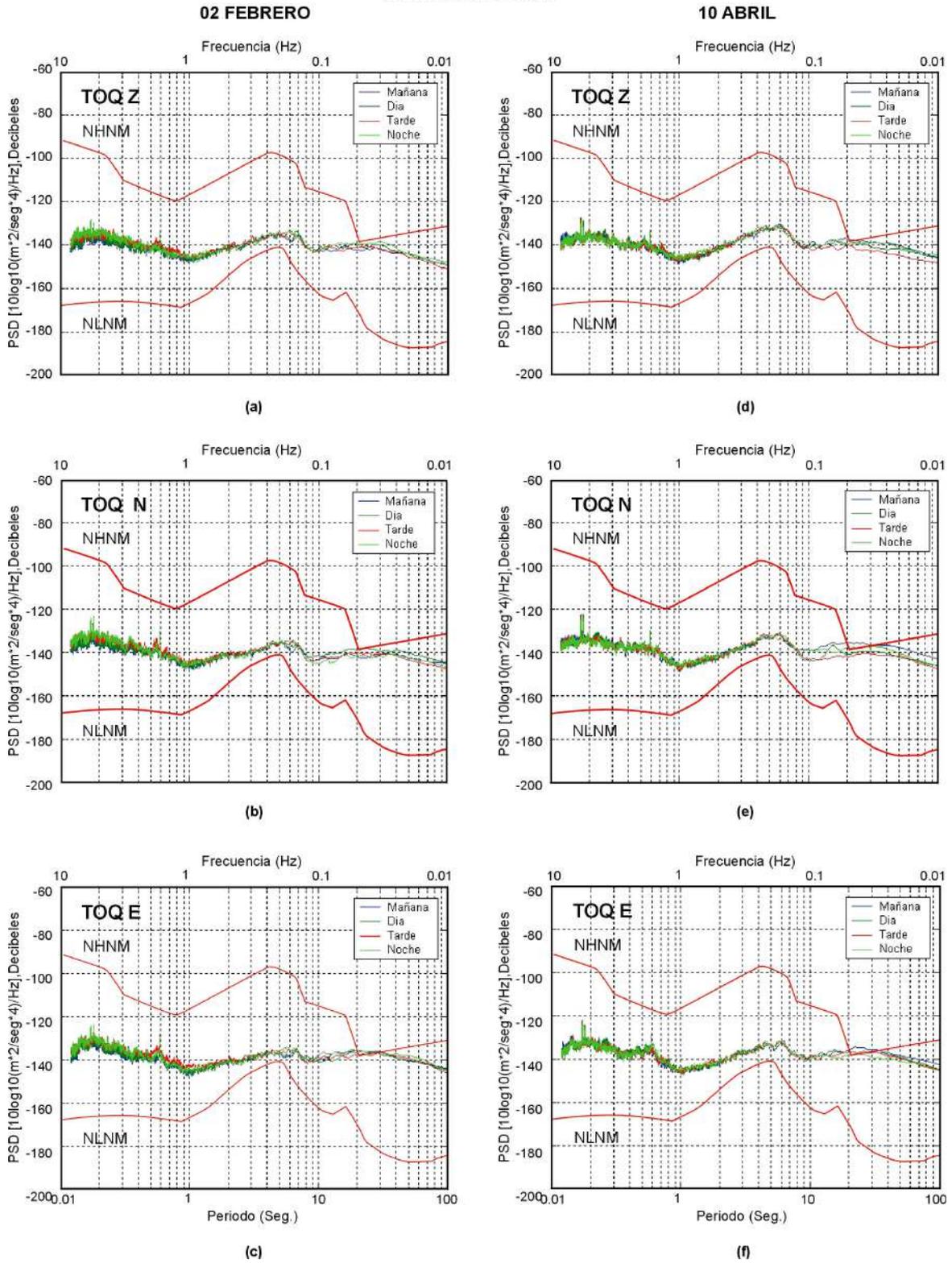


Figura 7.4.3. Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación TOQ para un día de los meses de Febrero y Abril del Año 2003. Comparado a las curvas teóricas de alto NHNM y bajo NLNM nivel de ruido según Peterson (1993).

### VARIACION DIURNA

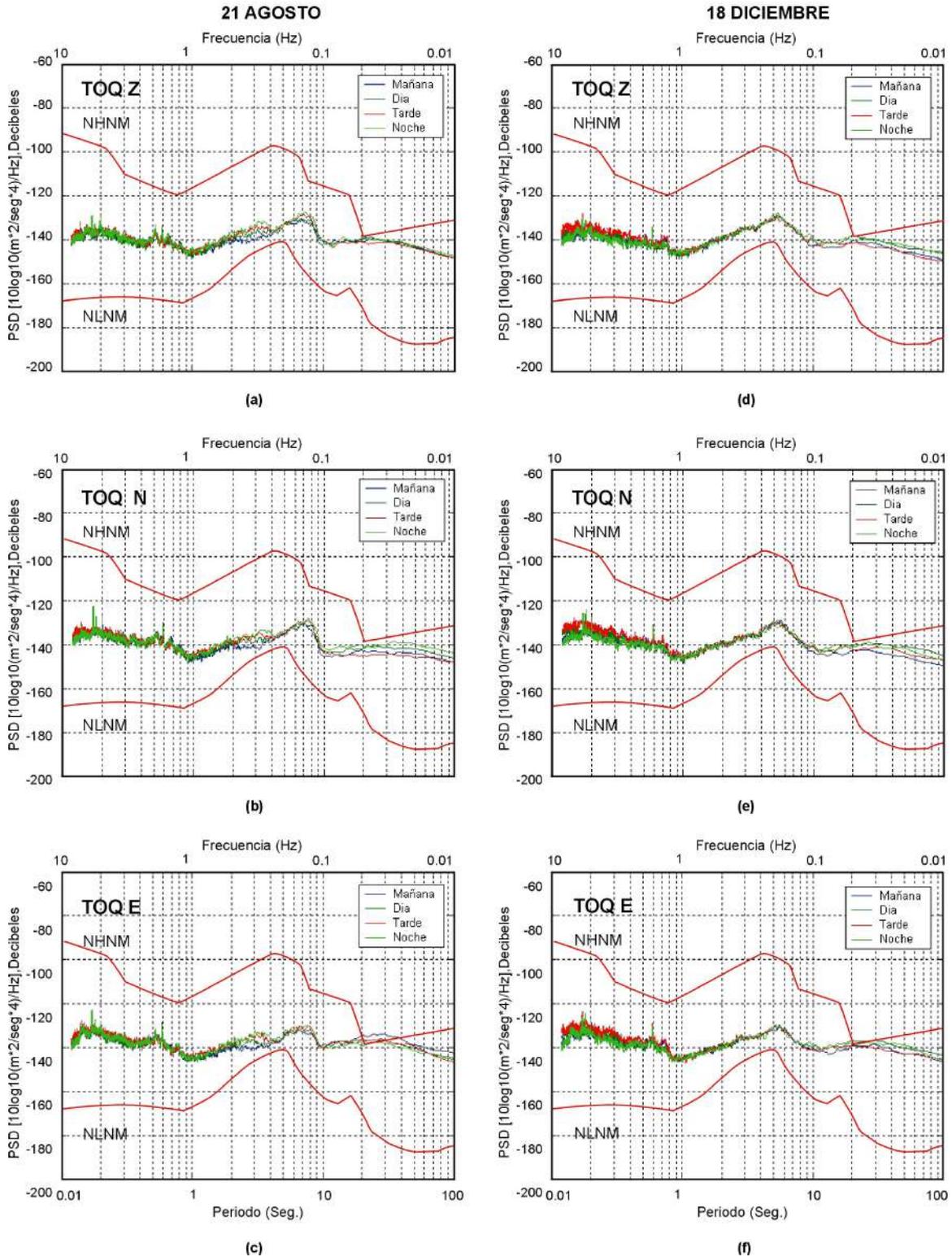


Figura 7.4.4. Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación TOQ para un día de los meses de Agosto y Diciembre del año 2003. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHNM y NLNM según Peterson (1993).

VARIACION ESTACIONAL

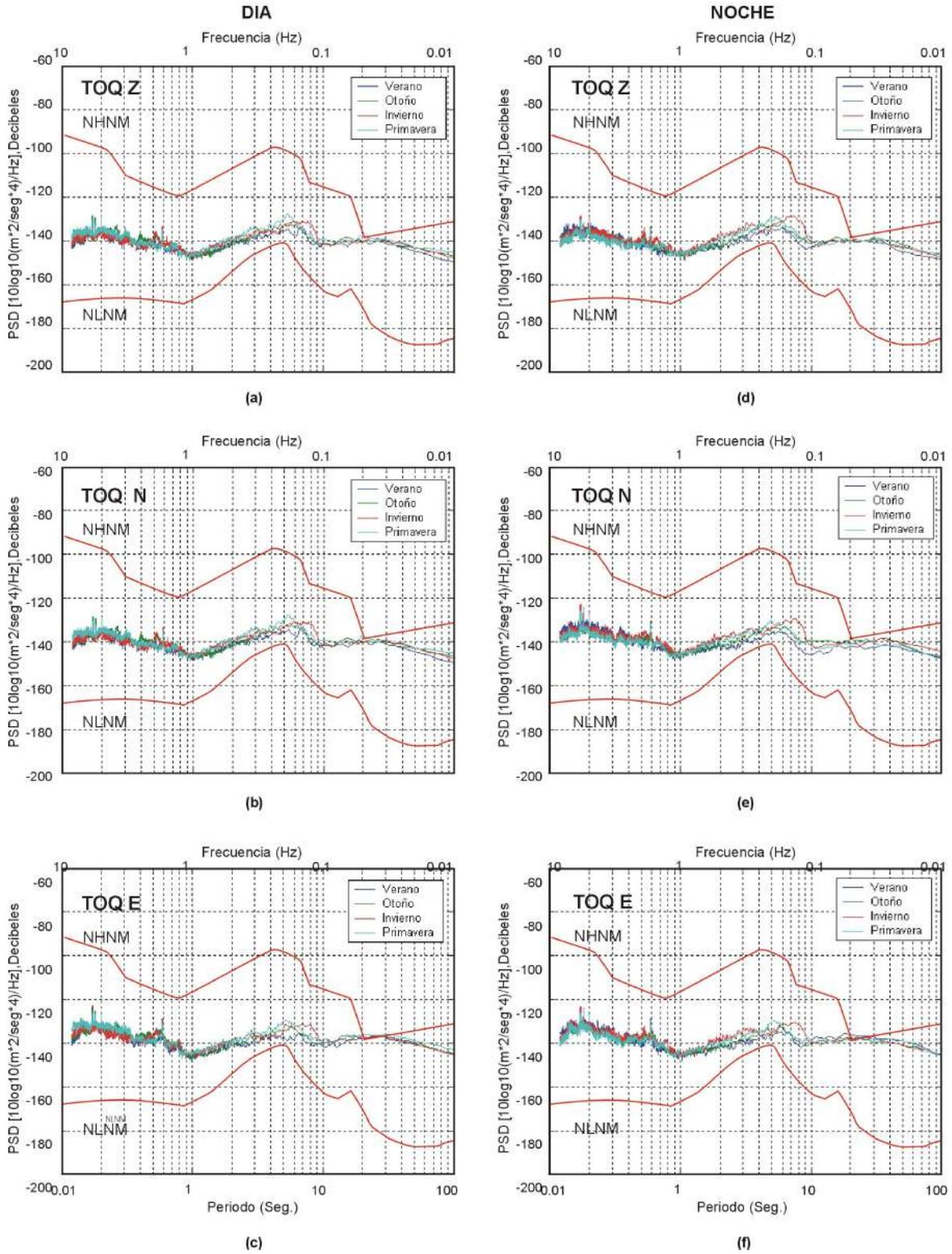


Figura 7.4.5. Variación Estacional de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes N, E y Z, de la estación TOQ para el día y la noche del Año 2003. Las curvas rojas corresponden a los niveles N1HM y N2LM según Peterson (1993).

### 7.4.5 Variación por Componente de Registro.

Las curvas de PSD se obtienen a partir del promedio anual de cada una de las componentes (N, E y Z) y sus resultados se muestran en la Figura 7.4.6. En dicha figura se aprecia que para las altas frecuencias (1 a 10 Hz.) el nivel de ruido es mayor en las componentes horizontales (N y E) sin variaciones durante el día y la noche. Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. se observa que no hay variaciones significantes; y para las bajas frecuencias (<0.1 Hz) el ruido es mayor en las componentes horizontales (N y E) con respecto a la vertical Z, lo que posiblemente se deba a la influencia local de la presión atmosférica.

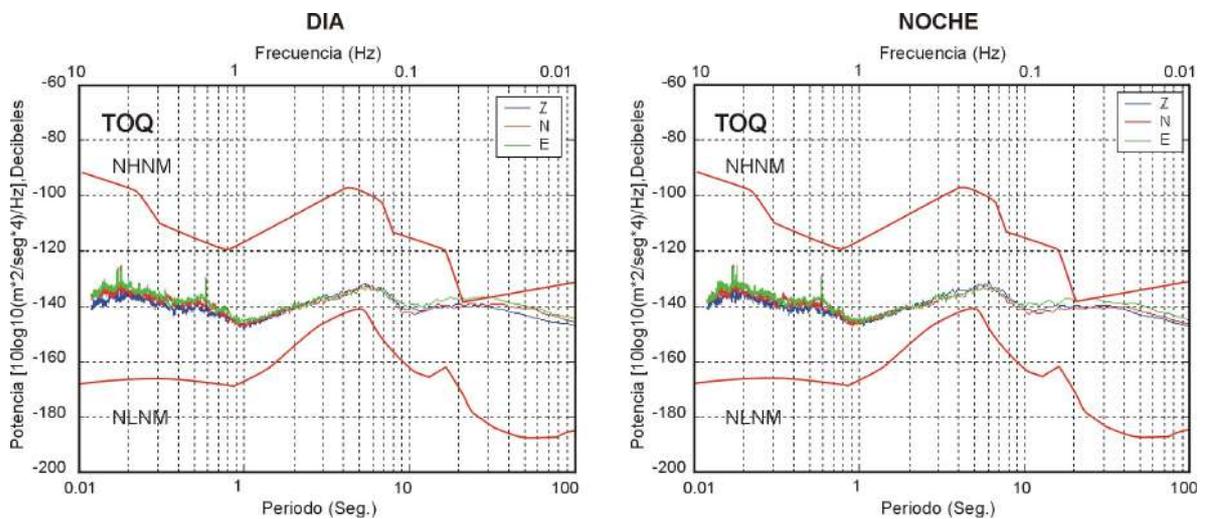


Figura 7.4.6. Promedio anual de los niveles de ruido presente en las componentes N, E y Z de la estación TOQ. Las curvas de PSD corresponden al promedio obtenido para el día y la noche del año 2003.

## 7.5 Estación Sísmica de Huancayo (HUA)

La estación sísmica de Huancayo, fue puesta en funcionamiento en Septiembre de 1997 en el departamento de Junín con en las siguientes coordenadas geográficas: Latitud Sur, 12.038°, Longitud Oeste, 75.322°, Altitud; 3330 m.s.n.m. Los instrumentos, tanto el de adquisición como el de registro se encuentran ubicados en las instalaciones del Observatorio Geofísico de Huancayo, dentro de una caseta y sobre un pilar de concreto construido en terreno de cultivo, tal como se muestra en la Figura 7.5.1



*Figura 7.5.1 La imagen muestra el ambiente en cuyo interior se encuentra la estación sísmica (HUA), Observatorio de Huancayo. Obsérvese la presencia de viviendas y árboles en las cercanías de la estación.*

### 7.5.1 Geología

Geomorfológicamente, la estación sísmica de Huancayo (Figura 7.4.2), se encuentra ubicada en los Andes Centrales del Perú y allí se diferencian clásicamente tres unidades geomorfológicas con rumbo NO, como la Cordillera Occidental, las Altas mesetas Centrales y la Cordillera Oriental. En el área donde se ubica la estación figuran porciones de las dos últimas unidades, así como parte de la depresión interandina de Jauja-Huancayo y la pequeña depresión de Ingahuasi. En el curso del cuaternario la erosión glacial y fluvial ha disectado la “Superficie Puna”, excavando las rocas mas blandas como las capas rojas del Cretaceo-Terceario y dejando en

relieve los afloramientos mas resistentes, cuyas cumbres aplanadas testimonian su antigua extensión (Megard, 1997).

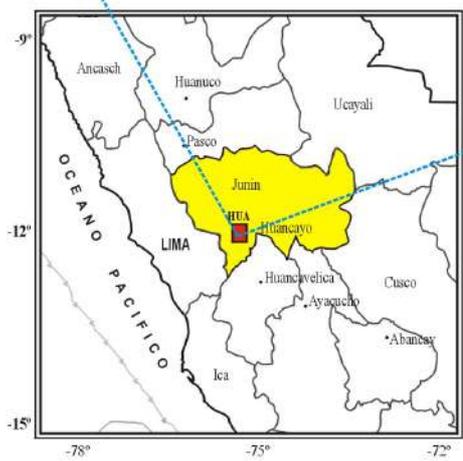
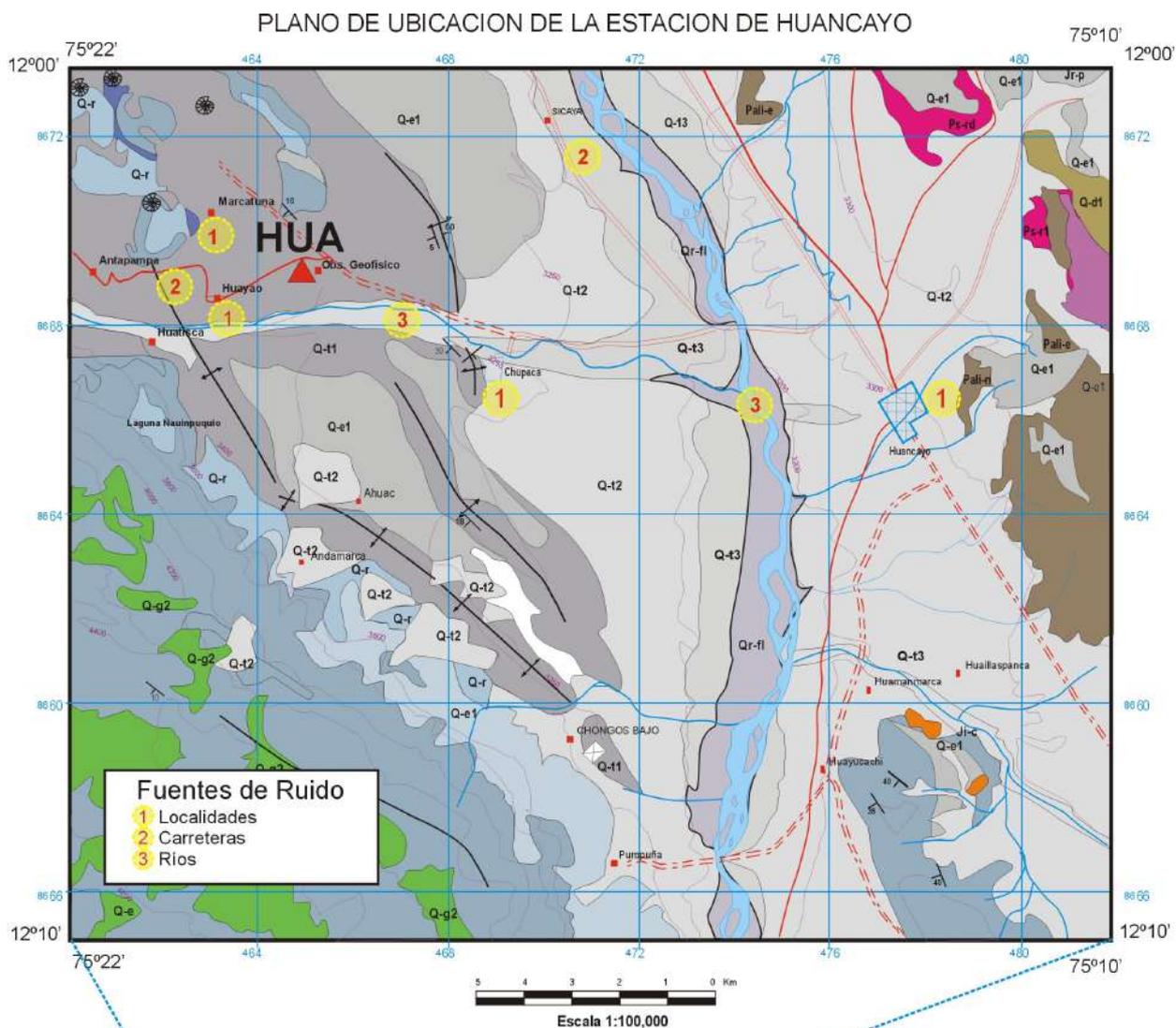
La depresión Jauja – Huancayo es alargada en dirección NO-SE y tiene una longitud aproximada de 70 Km. con un ancho que varia entre 3 a 15 Km.; su altura varia entre 3,160 y 3,350 m. Siendo atravesada por el río Mantaro la atraviesa a “grosso modo” siguiendo su eje NO-SE. El fondo de la cuenca esta tapizado por espesas formaciones cuaternarias que constituyen un sistema de terrazas escalonadas, localmente interrumpidas por los conos aluviales de los afluentes del Mantaro; las terrazas mas antiguas están afectadas por las flexuras y pliegues bien caracterizados. La estación sísmica se encuentra ubicada sobre rocas de depósitos glaciares de morrenas y terrazas de conglomerados del Cuaternario. Figura 7.4.2.

### **7.5.2 Clima**

El clima de la zona, como el de la mayor parte de los Andes Peruanos, está caracterizado por la alternancia de clima seco (abril a noviembre) y otra lluviosa (diciembre a marzo), en la que las temperaturas promedio oscilan entre 10º y 13º C., Durante los meses de junio y julio son frecuentes las heladas y las precipitaciones alcanzan 400 a 700 mm. por año.

### **7.5.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico**

Para el análisis de las variaciones diurnas del nivel de ruido se han tomado registros de una hora, para la mañana (6:00 a.m.), medio día (12:00), tarde, (18:00 p.m.) y media noche (12:00). correspondiente a los días 02 de Enero, 05 de Mayo, 03 de Agosto y 02 de Noviembre año 2003. Analizando las curvas de PSD (Figuras 7.5.3 y 7.5.4) se observa que para el rango de altas frecuencias (1 a 10 Hz.), las variaciones del nivel de ruido presentan amplitudes máximas de 10 a 13 dB durante las horas del día siendo menor durante la noche. Es probable que las variaciones del nivel de ruido se deban a la presencia cercana de carreteras, áreas de cultivo y algunas localidades.



#### DIVISION DEL CUATERNARIO

CRONOLOGIA RELATIVA	Depósitos glaciares	Tarrazas y depósitos fanoglaciales	Depósitos coluviales resacasivos (P-ol) anhelados	Superficies de erosión local	Terra rossa (r) y travertines (tr)
Presente	Q-ol	Q-ol	Q-ol	Q-ol	Q-ol
Depósitos ligados a la tercera glaciación	Q-3	Q-3	Q-3	Resacasivo Q-3	Q-3
Depósitos ligados a la segunda glaciación	Q-2	Q-2	Q-2	Resacasivo Q-2	Q-2
Depósitos ligados a la primera glaciación	Q-1	Q-1	Q-1	Resacasivo Q-1	Q-1

EDAD	ROCAS INTRUSIVAS
TERCIARIO SUPERIOR	Granitos y micaxgranitos (gr) y rielitas (r)
TERCIARIO INFERIOR	Trapp
JURASICO	
PERMIANO SUPERIOR	
PERMIANO INFERIOR	Basaltos y dacitos andesíticos
DEVONIANO Y PALEOZOICO INFERIOR (?)	

Figura 7.5.2. Plano de localización geográfica y geológica de la Estación de Huancayo (HUA). Se muestra las fuentes de ruido indicados en círculos amarillos enumeradas del 1 al 3. El triángulo rojo indica la ubicación de la estación.

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz no se observan variaciones diurnas significantes del nivel de ruido, lo cual pueda deberse a la ubicación geográfica de la estación sísmica y a su distancia al océano pacifico; por lo tanto, el nivel de ruido en esta banda de frecuencias esta cercana a la curva de mínimo ruido propuesta por Peterson (1993).

En el rango de las bajas frecuencias (0.01 a 0.1 Hz.) se observa que el nivel de ruido es alto comparado con las curvas propuestas por Peterson (1993), siendo las amplitudes mayores para las componentes horizontales (N y E), lo cual puede deberse a los efectos de la presión atmosférica ya que el sensor sísmico se encuentra ubicado sobre un pilar de concreto en la superficie del terreno.

#### **7.5.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico**

A continuación se procede a analizar las variaciones de los niveles de ruido con respecto a los cambios estacionales durante el año (Figura 7.5.5). Para tal fin se ha considerado los datos para las horas más ruidosas del día y la noche correspondiente al año 2003.

Para el rango de frecuencias entre 1 a 10 Hz las amplitudes se mantienen casi simétricos durante todo el año, y las ligeras variaciones se presentan en la estación de verano, lo cual posiblemente se deba al incremento de lluvias en esta época del año.

En el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. se observa que durante la estación de invierno sea de día o noche el nivel de ruido es mayor y posiblemente se deba a que en esta época del año se incrementan los vientos y las tormentas en el Océano Pacifico ocasionado por el anticiclón del Pacifico Sur.

Para el rango de las bajas frecuencias (0.01 a 0.1 Hz.), el nivel de ruido se mantiene alto durante todo el año, con ligeras variaciones en la amplitud durante la estación del invierno, lo cual se debería a variaciones locales de la presión atmosférica.

## VARIACION DIURNA

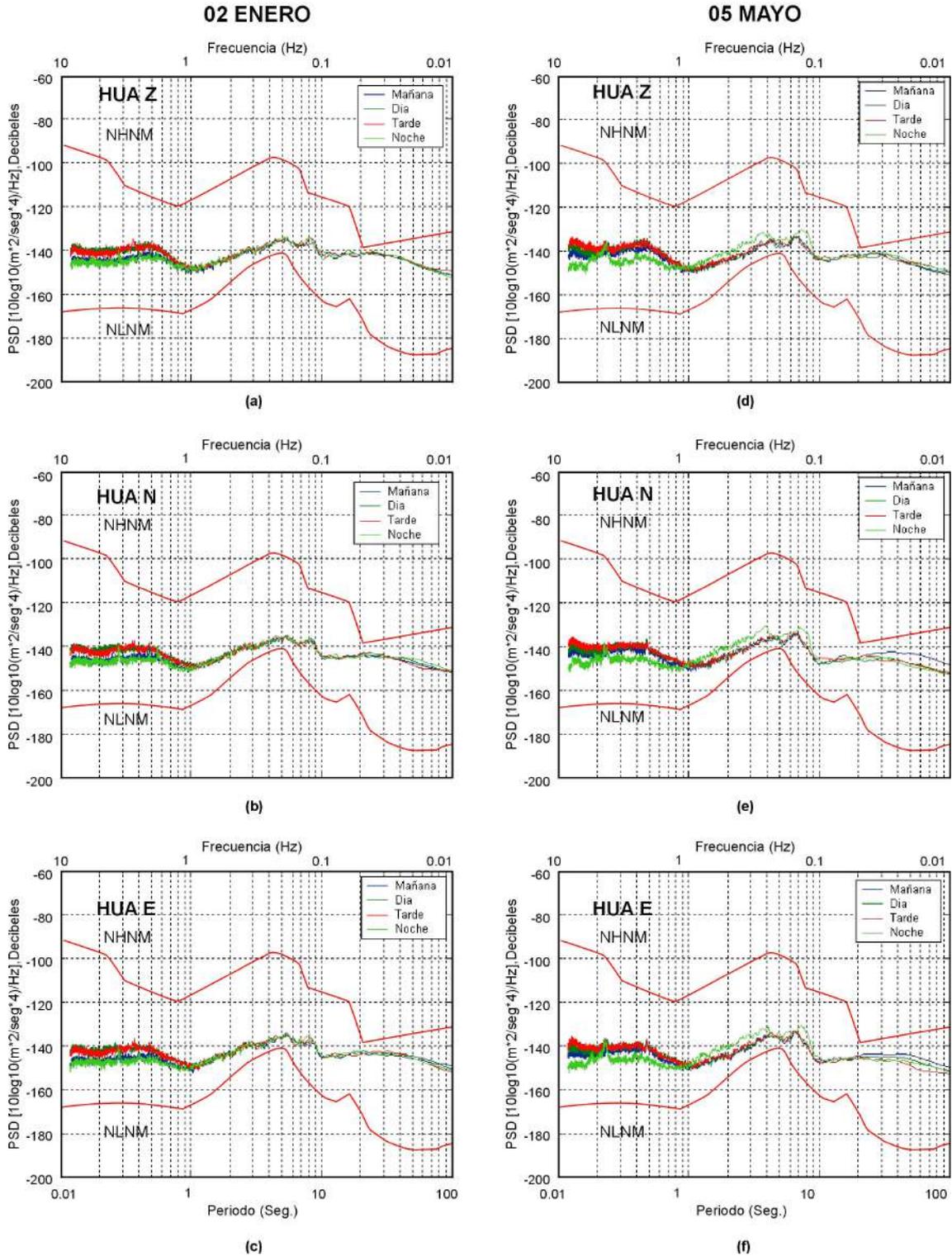


Figura 7.5.3. Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación (HUA) para un día de los meses de Enero y Mayo del Año 2003. Las curvas de color rojo corresponden a las niveles HNMN y LNMN según Peterson (1993).

VARIACION DIURNA

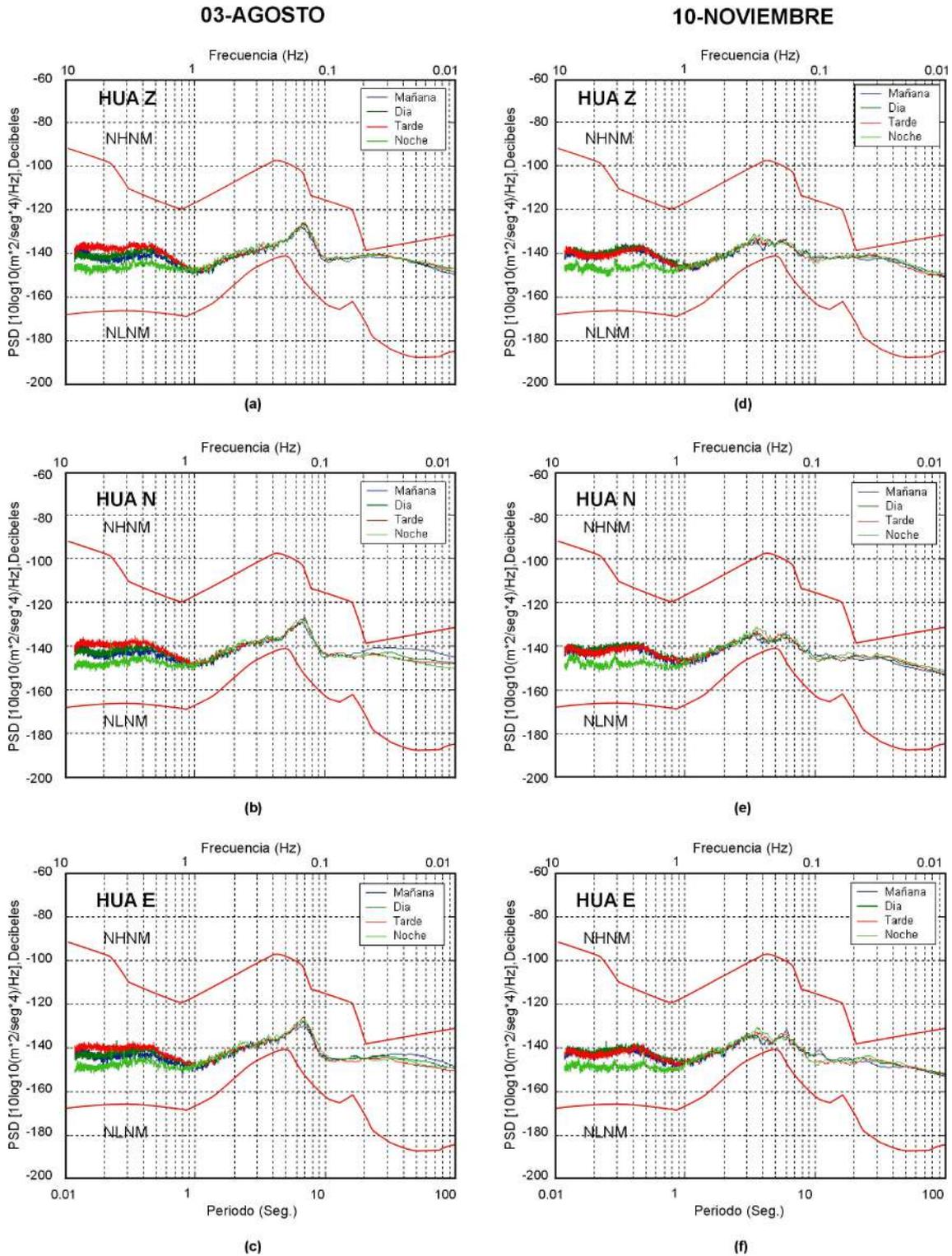


Figura 7.5.4 Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación (HUA) para un día de los meses de Agosto y Noviembre, del año 2003. Las curvas de color rojo corresponden a las niveles HNMN y LNMN según Peterson (1993).

## VARIACION ESTACIONAL

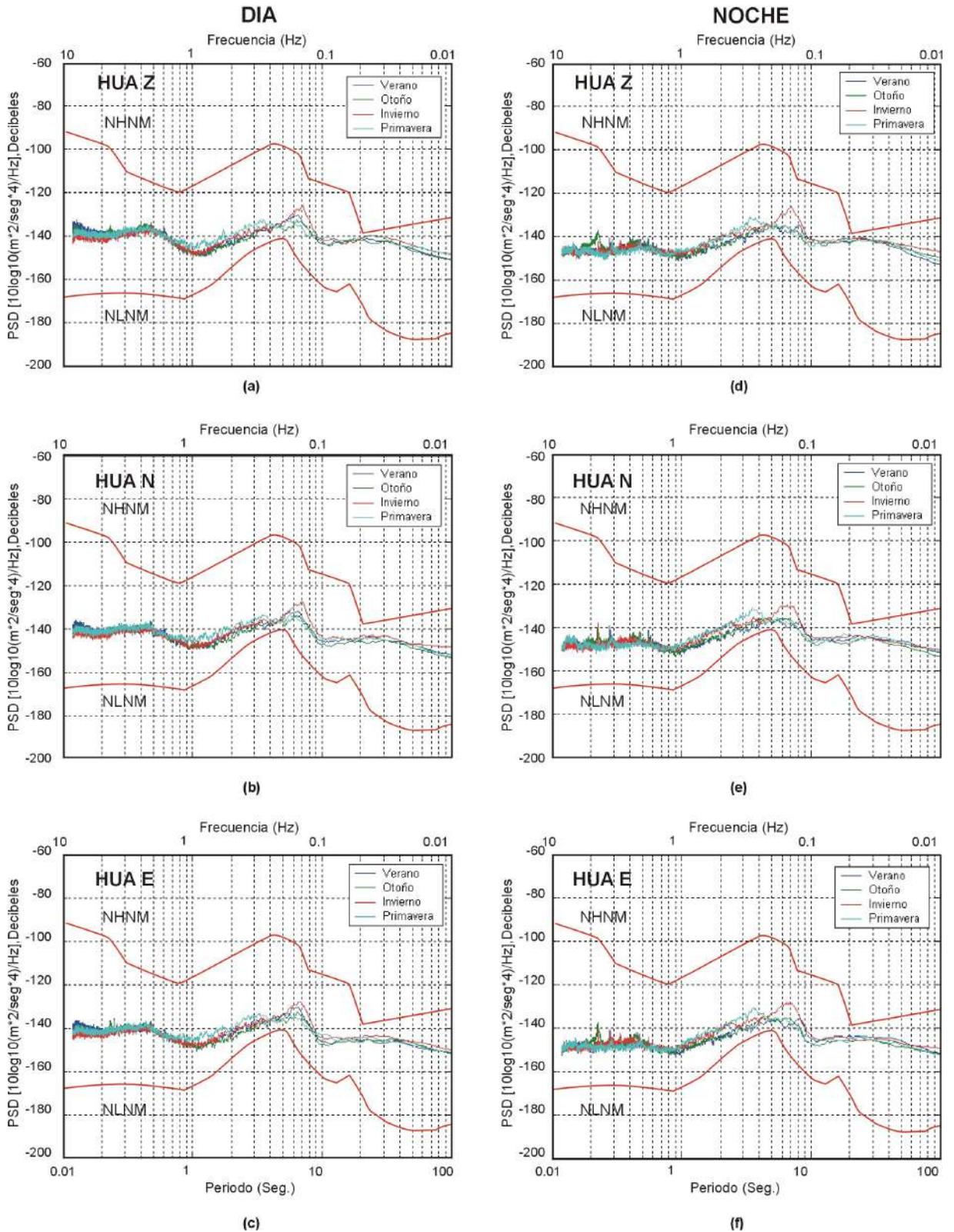


Figura 7.5.5. Variación estacional de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes (N, E y Z) de la estación Huancayo (HUA) para el día y la noche del Año 2003. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHNM y NLNM según Peterson (1993).

### 7.5.5 Variación por Componente de Registro.

Del análisis de la Figura 7.5.6, se puede observar que para ruidos en el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz. en la componente vertical (Z) se produce un ligero incremento en la amplitud del ruido debido probablemente a las actividades culturales propias del área donde se ubica la estación sísmica, siendo mayor durante el día.

Entre el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz no se presenta variaciones significantes en las tres componentes, y para las bajas frecuencias (0.01 a 0.1 Hz.) se observa que la componente vertical (V) presenta mayores amplitudes que las componentes horizontales (N y E), lo cual se debe a efectos de la presión atmosférica debido a que el sensor se encuentra cerca de la superficie.

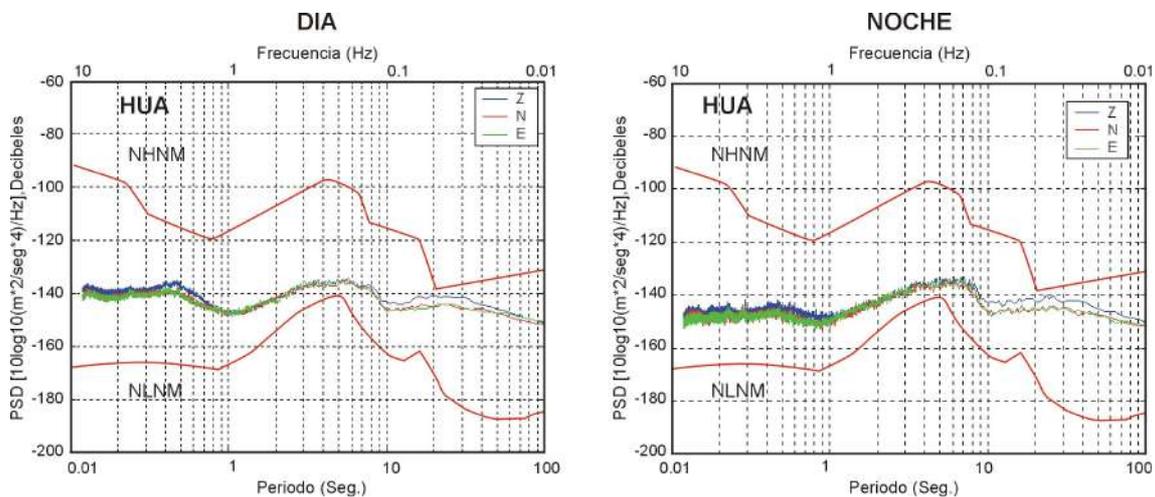
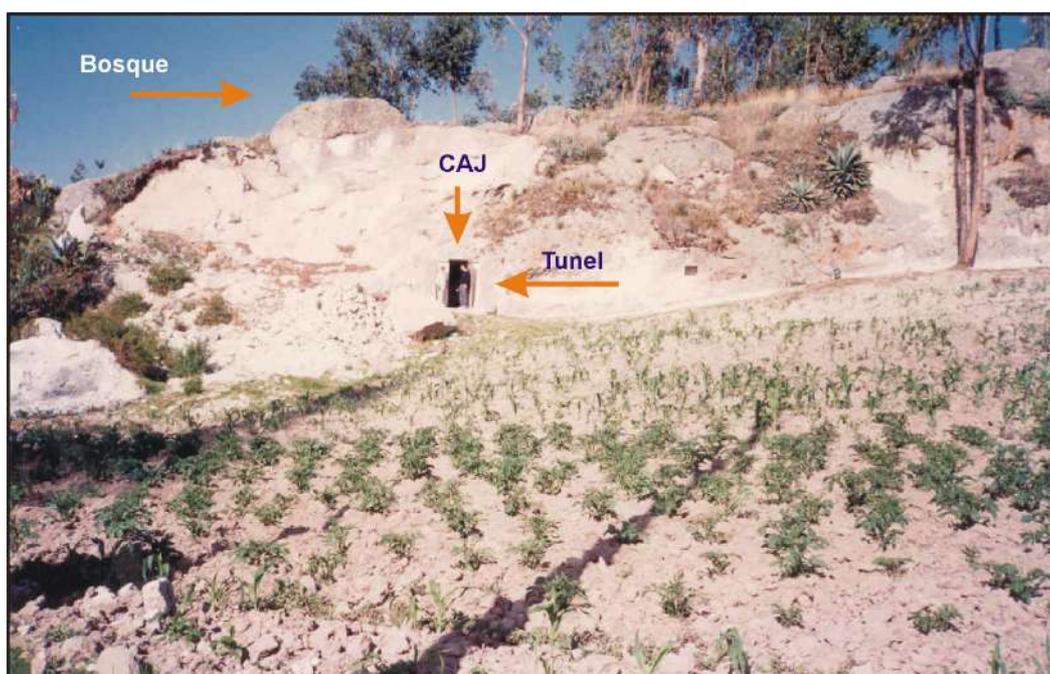


Figura 7.5.6. Promedio anual de los niveles de ruido presente en las tres componentes (N, E y Z) de la estación HUA. Las curvas de PSD corresponden al promedio obtenido para el día y la noche del año 2003.

## 7.6 Estación Sísmica de Cajamarca (CAJ)

La Estación sísmica de la Cajamarca fue puesta en funcionamiento en Octubre de 1997 y se encuentra ubicada a 3 Km al Norte de la ciudad de Cajamarca con las siguientes coordenadas geográficas: Latitud 07.130° S, Longitud 78, 516° W y elevación 2750 m. Los instrumentos, tanto el de adquisición (sensor sísmico) como el de registro (registrador), se encuentran ubicados sobre una loza en el interior de un pequeño túnel de 10 m. de longitud, tal como se muestra en la Figura 7.6.1



*Figura 7.6.1 La imagen muestra la entrada al túnel en cuyo interior se encuentra la estación. Obsérvese el tipo de suelo sobre la cual se encuentra la esta estación, así como la presencia de un pequeño bosque en la cercanía de la estación.*

### 7.6.1 Geología

Geomorfológicamente, el área donde se encuentra la estación sísmica CAJ presenta superficies de erosión a diferentes niveles, siendo la más alta la llamada "Superficie de Puna" que sobrepasa de los 4,000 m.s.n.m. Aunque todas entran en pleno proceso de destrucción por la intensa erosión que se ha acentuado recientemente debido al levantamiento general de la región y por la profundización de los valles debido al drenaje, en tanto que las partes mas altas fueron modificadas por efectos de la glaciación plio-pleistocénica (Reyes, 1980). Estratigráficamente, la zona de estudio presenta una geología bastante variada con afloramientos de rocas que van desde el Cretáceo Inferior (Grupo Goyllirisquizga) al Cuaternario Reciente (Depósitos

aluviales y fluviales), (Figura 7.6.2.). El sensor de la estación sísmica CAJ, se encuentra ubicado sobre rocas volcánicas del Grupo Huambo, compuestas por tobas andesíticas y traquíticas de dureza baja a media del Terciario Superior.

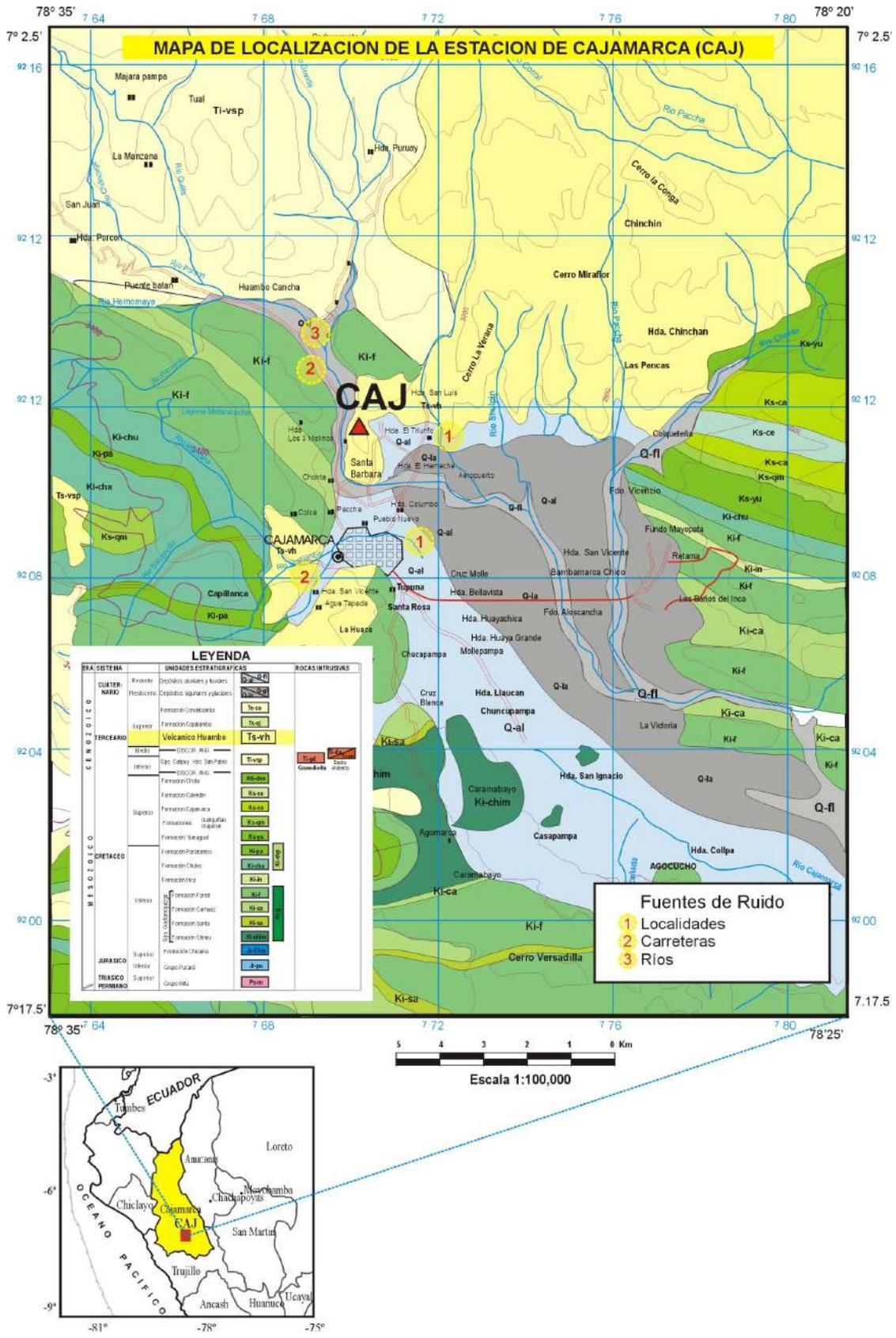
### **7.6.2 Clima**

La región presenta dos estaciones características, una lluviosa de Diciembre a Marzo y otra seca de Abril a Noviembre con sus respectivas etapas transicionales; sin embargo, este ciclo tiene periodos excepcionales cuando se presentan sequías y/o abundantes precipitaciones, con funestas consecuencias para la agricultura, ganadería y en general, para la economía de la región. Los principales afluentes de la cuenca del río Cajamarca se encuentran en la parte norte de la estación sísmica.

La diversidad de alturas hacen que el clima y la vegetación sean diferentes según los lugares. En las cumbres que pasan los 4,500 m.s.n.m., presentan un clima frígido y ausencia de vegetación; las extensas punas se encuentran entre los 3,500 a 4,500 m.s.n.m. Las temperaturas bajan hasta los 0° C por las noches y sobresale una vegetación conocida como "ichu"; por debajo de estas alturas recién comienzan a usarse los terrenos para cultivos; Por lo tanto la mayoría de caseríos y pueblos se encuentran en este nivel, exceptuando a los centros mineros que circunstancialmente están más altos. El clima en los principales valles (Cajamarca, Jequetepeque y Chicama), son frescos en sus nacientes y templados en sus partes bajas.

### **7.6.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico**

Para el análisis correspondiente a las variaciones diurnas del nivel de ruido se han tomado registros de una hora, para la mañana (6:00 a.m.), medio día (12:00), tarde, (18:00 p.m.) y media noche (12:00) correspondiente a los días 15 de Febrero, 16 de Mayo, 15 de Agosto y 13 de Noviembre del año 2004 (Figuras 7.6.3 y 7.6.4). Las curvas de PSD muestran que para el rango de frecuencias de 3 a 10 Hz. las variaciones diurnas presentan amplitudes del orden de 10 dB siendo su a la influencia del ruido cultural debido a que la estación CAJ se encuentra cerca de terrenos de cultivo y a 3 Km de la ciudad de Cajamarca.



En el rango de frecuencias 0.1 a 1 Hz no se observan variaciones significantes, posiblemente a que la estación sísmica se encuentra en el continente y alejado del océano pacífico, estando las curvas de PSD cercanas al nivel bajo de ruido propuesto por Peterson (1993). Para el rango de bajas frecuencias (0.01 a 0.09 Hz), se observa que el nivel de ruido se mantiene estable y bajo durante todo el año y no presenta variaciones significantes. Es posible que esto se deba a que el sensor se encuentre colocado dentro de un túnel de 10 m de longitud y sobre roca semidura (tobas andesíticas).

#### **7.6.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico**

Para el análisis de la variación estacional del ruido se ha considerado datos para las horas más ruidosas del día para el año 2004 y los resultados son: Para el rango de frecuencias entre 1 y 10 Hz se observa las curvas de nivel de ruido mantienen la misma simetría durante todo el año. El incremento se debería por la presencia del ruido cultural existente en la zona y por el tipo de roca sobre el cual se encuentran ubicado el sensor sísmico. En esta banda de frecuencias se observa la presencia de picos a frecuencias de 3 Hz. que posiblemente se deban a las explosiones mineras que se realizan en el área. En el rango de frecuencias de 6 a 9.5 Hz. se observan variaciones con amplitudes de 6 a 7 dB en la estación de la Primavera, lo que posiblemente se deba al incremento de vientos en esta estación del año y que afectaría al incremento de los niveles de ruido debido a la presencia de un bosque en las cercanías de la estación.

Para el rango de frecuencias 0.1 a 1 Hz, se observan variaciones estacionales con diferencias de amplitud del orden de 5 a 8 dB, siendo durante las estaciones de Otoño e Invierno en donde el ruido presentan mayores amplitudes y posiblemente se deba al incremento de los vientos que se producen en el Océano Pacífico Sur en estas épocas del año. Sin embargo los niveles de ruido se encuentran cercanas a la curva de nivel mínimo de ruido propuesto por Peterson (1993).

Para el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. el nivel de ruido presenta variaciones en la estación de invierno con diferencias de amplitud del orden de 10 dB. en relación a los niveles de ruido en otras estaciones del año, esto es debido a que en esta época del año los valores de presión atmosférica son mayores. En las demás estaciones se presenta estable esto podría deberse a que la estación se encuentra en el interior de un pequeño túnel de 10 m de longitud.

VARIACION DIURNA

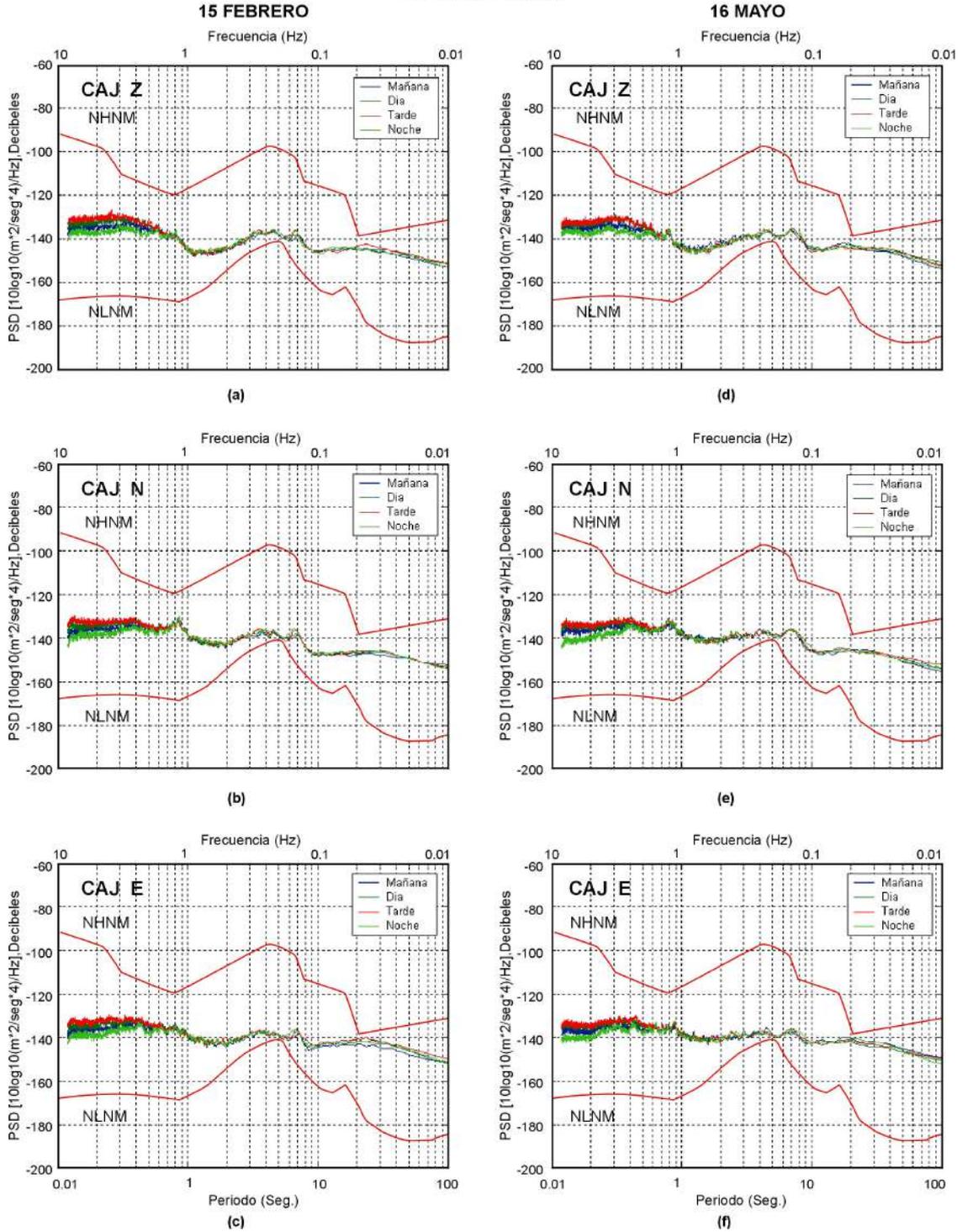


Figura 7.6.3 Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación CAJ, para un día de los meses de Febrero y Mayo del año 2004. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles alto NHNM y bajo NLNM según Peterson (1993).

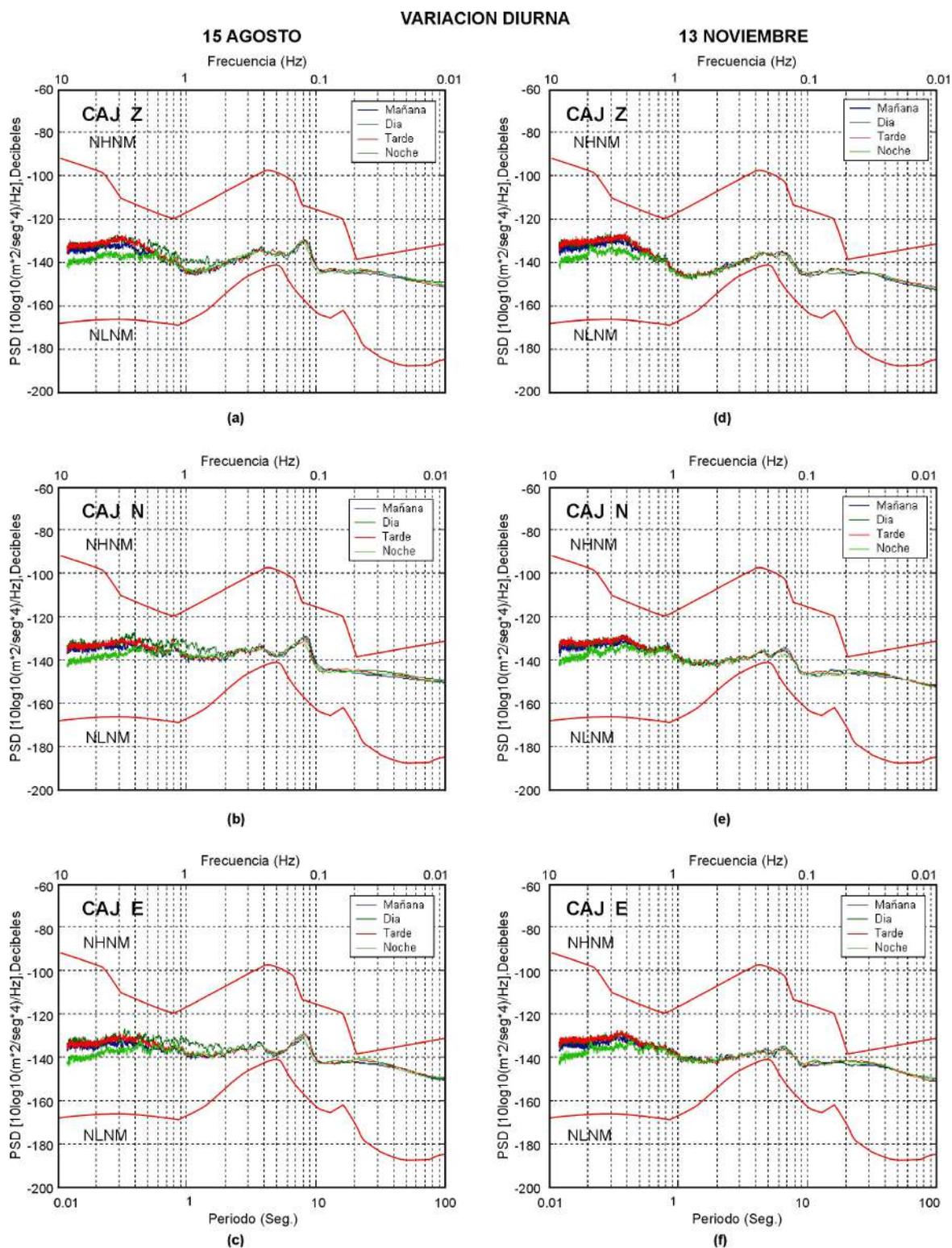


Figura 7.6.4 Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación CAJ, para un día de los meses de Agosto y Noviembre del año 2004. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles alto NHHM y bajo NLNM según Peterson (1993).

### VARIACION ESTACIONAL

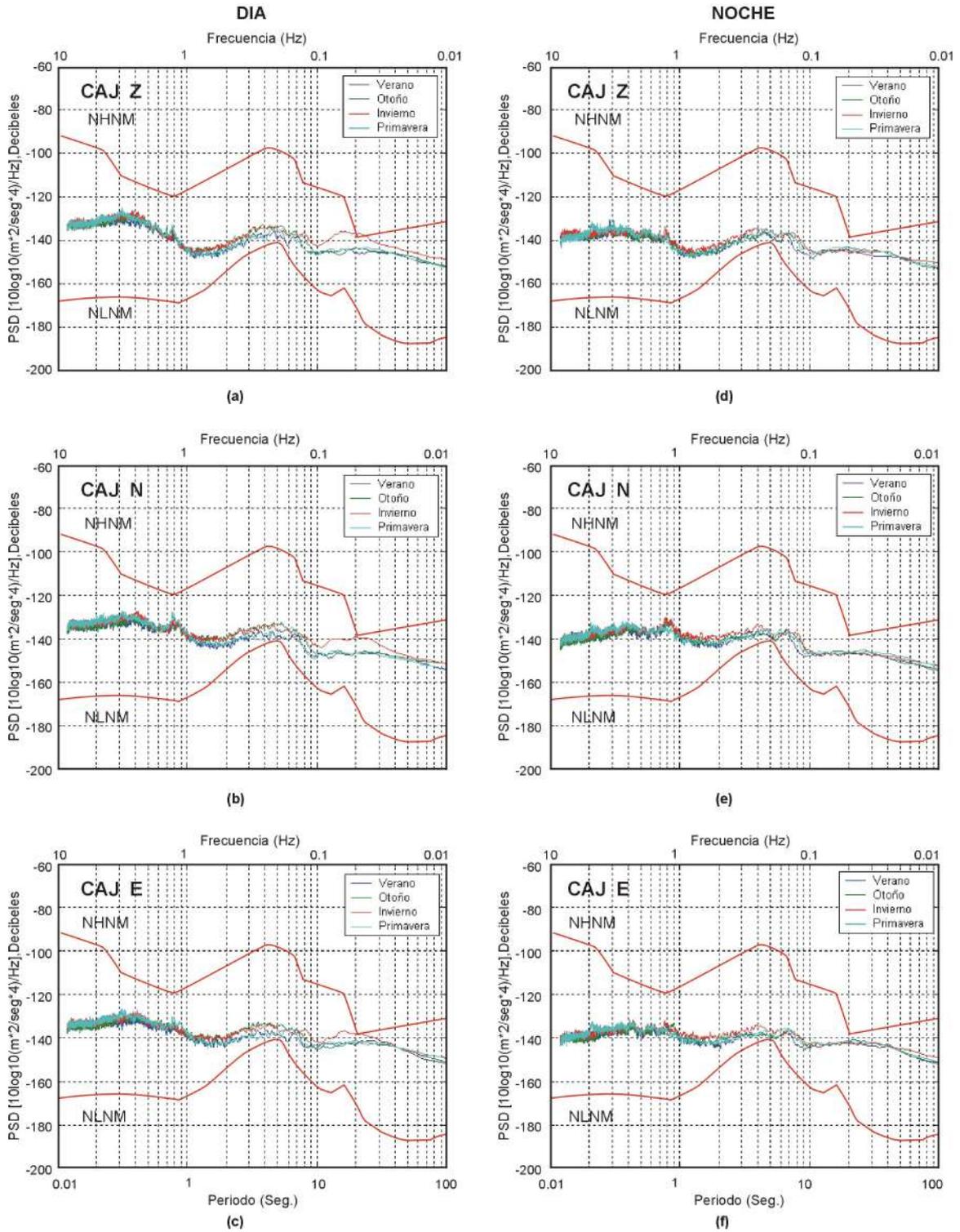


Figura 7.6.5 Variación estacional de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes (N, E y Z) de la estación CAJ para el Día y la Noche del Año 2004. Las curvas rojas corresponden a los niveles alto NHNM y bajo NLNM según Peterson (1993).

### 7.6.5 Variación por Componente de Registro

Las curvas de PSD se obtienen al calcular promedio anual para cada una de las componentes de registro (N, E y Z) y su análisis permite considerar lo siguiente (Figura 7.6.6): Para el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz se observa que la componente Z presenta ligeras variaciones en las amplitudes del nivel de ruido con respecto a las horizontales (N y E), siendo mayores estas entre de 1 y 6 Hz.

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. no se observan variaciones entre los niveles de ruido en las 3 componentes y para las bajas frecuencias (<0.1 Hz), el ruido es mayor en la componente E con respecto a las componentes (N y Z), posiblemente se deba a la influencia local de la presión atmosférica sobre el sensor sísmico y el tipo de suelo sobre el cual se ubica la estación.

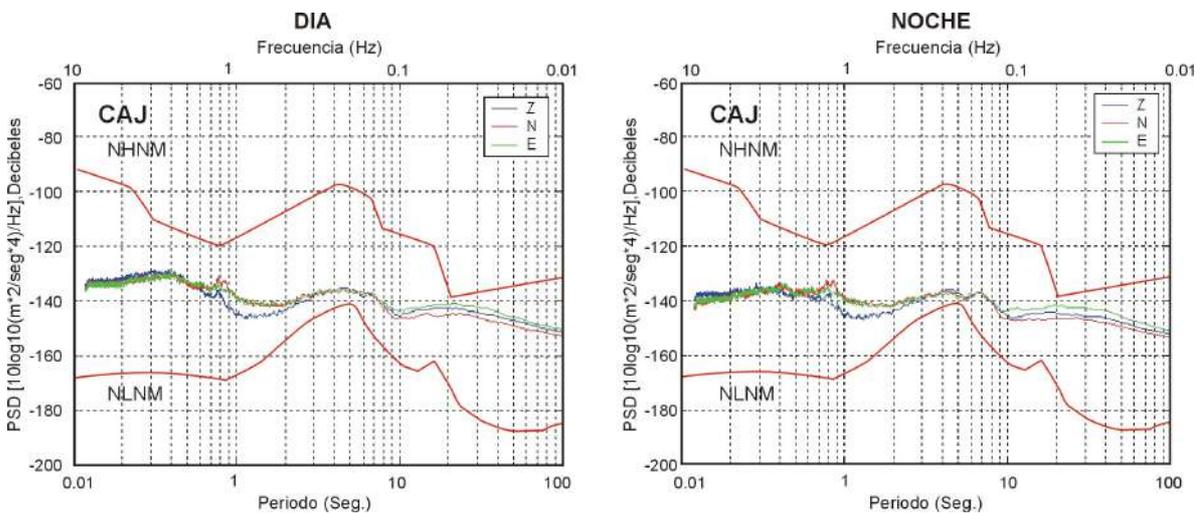


Figura 7.6.6 Promedio anual de los niveles de ruido presente en las componentes (N, E y Z) de la estación CAJ. Las curvas de PSD corresponden al promedio obtenido para el día y la noche del año 2004.

## 7.7 Estación Sísmica de Chachapoyas (CHA)

La Estación sísmica de la Chachapoyas fue puesta en funcionamiento en Diciembre del 2002 a 6 Km. al Sur de la ciudad de Chachapoyas y con las siguientes coordenadas geográficas: Latitud 06.269° S y Longitud 77, 856° W y elevación 3041 m. El instrumental de adquisición (sensor sísmico) y registro (registrator) se encuentran ubicados sobre una loza en el interior de un pequeño pozo, tal como se muestra en la Figura 7.7.1.



*Figura 7.7.1 Ubicación de la estación Chachapoyas (CHA). Obsérvese que el sensor se encuentra en un pequeño pozo, así como el tipo de suelo en la estación.*

### 7.7.1 Geología

La zona donde se encuentra ubicada la estación sísmica (Figura 7.7.2.) presenta un relieve ondulado, con algunas prominencias aisladas y alargadas de rumbo andino que son disectadas por ríos que han formado valles profundos, de flancos escarpados, labrados en rocas cretáceas y cuya estructura define las altiplanicies. El sector de Chachapoyas corresponde al flanco subandino y selva alta con altitudes máximas de 2,400 y mínimas de 1,300 m.s.n.m. La degradación irregular ha definido la presencia de cadenas longitudinales y transversales a la estructura andina, labrados mayormente en rocas sedimentarias mesozoicas. En la región existen importantes fallas de tipo diverso como la falla de Chachapoyas que se

encuentra entre la estación y la ciudad de Chachapoyas. La red hidrográfica que drena la superficie del área, forma parte de la cuenca hidrográfica del Amazonas y esta constituida por ríos y lagunas ubicadas en la cordillera. El drenaje principal esta controlado por los colectores principales al río Marañon y sus afluentes más notables son los ríos Uctubamba y Nieva (Sánchez, 1995).

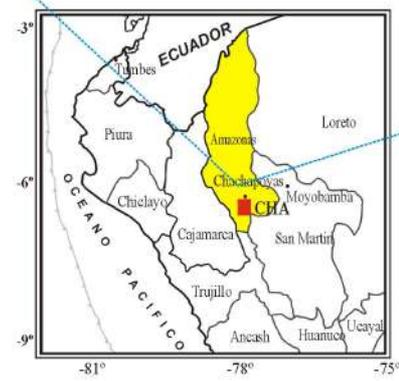
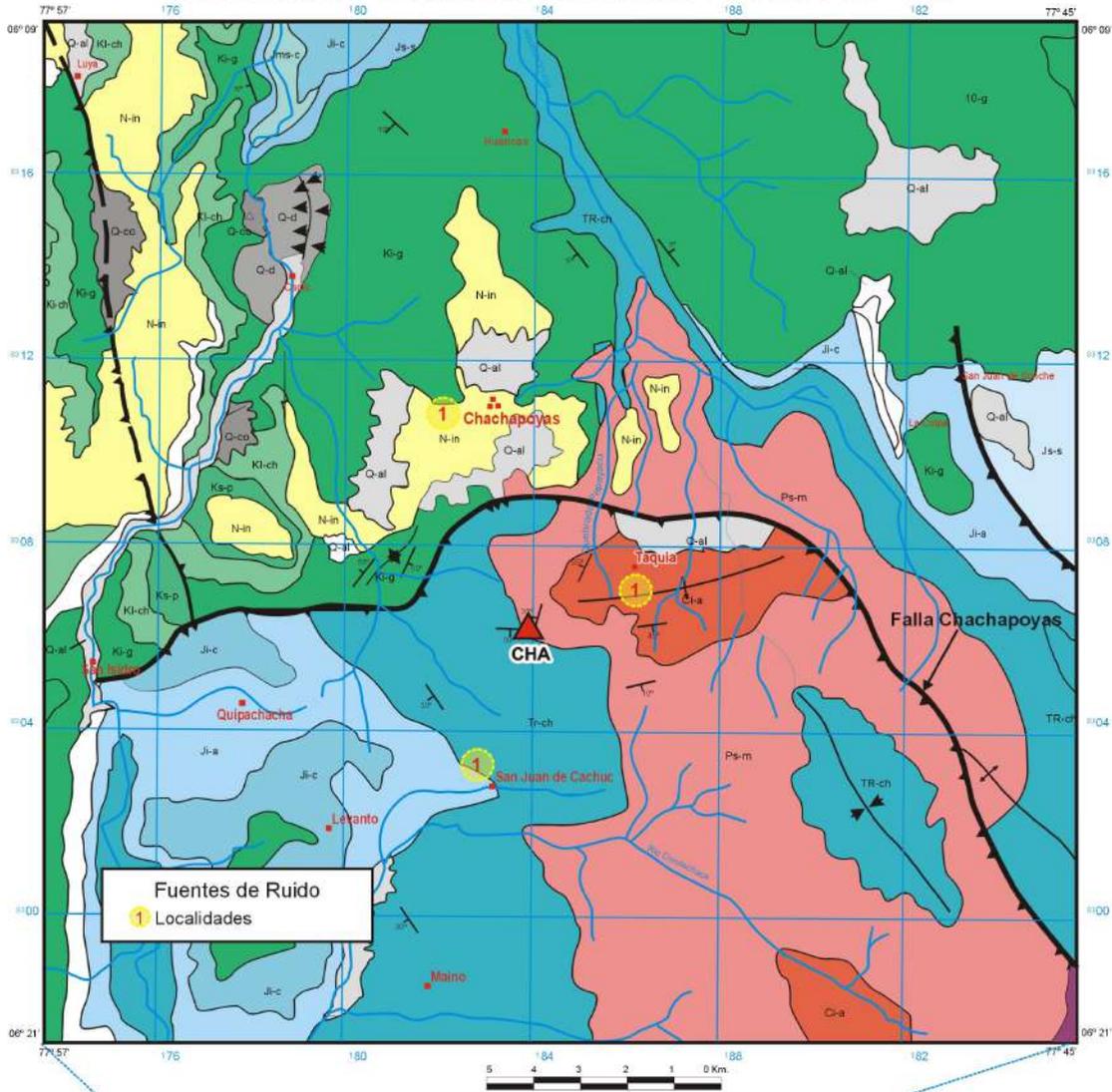
El sensor de la estación sísmica se encuentra ubicado sobre rocas sedimentarias del grupo Mitu que corresponden al Paleozoico y formados por rocas clásticas (areniscas rojas) continentales que se encuentran sobre estratos medianos a gruesos que se diferencian fácilmente por su color rojo y su resistencia a la erosión. El área de Chachapoyas ocupa gran parte de la Cordillera Oriental siguiendo una dirección NO-SE. Los componentes líticos del grupo Mitu, son areniscas, lodolitas y conglomerados polimicticos bien cementados. El límite superior del grupo Mitu corresponde a una discordancia angular con rocas calcáreas del Grupo Pucará.

### **7.7.2 Clima**

Debido a la notable variación altitudinal y morfológica del área estudiada, se presentan una gran variedad de climas que van desde el cálido-húmedo al frío-templado. En el fondo de los valles hasta los 1000 metros de altura existen temperaturas altas a lo largo de todo el año durante el día y la noche sin variaciones estacionales notables. Hacia el oriente entre 500 y 1000 m el clima es cálido y húmedo con una media anual superior de 22° y 17° C. Entre los 1,000 y 2000 m.s.n.m. la temperatura anual media oscila entre 18° a 20° C, siendo los días calurosos y las noches templadas - frescas.

Entre los 3000 y 3500 metros, que es donde se ubica la estación CHA, la humedad y llovizna continuada favorecen la existencia de pastos naturales con un clima templado y con máximas temperaturas de 29 °C entre Octubre y Enero, y las mínimas entre Mayo y Agosto de 7 °C entre el día y la noche. La precipitación anual es de 1800 mm, la máxima mensual (Marzo) de 250 mm y la mínima 145 mm.

MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN DE CHACHAPOYAS - CHA



LEYENDA

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOSTRATIGRAFICAS	ROCAS IGNEAS
CUATERNARIO	QUICUENARIA	ALUVIAL	Depositos Coluviales (Q-cl)	
		ALUVIAL	Depositos Aluviales (Q-al)	
		ALUVIAL	Depositos de Deslizamiento (Q-d)	
NEOGENO	PACUENARIA	ALUVIAL	Depositos Aluviales (N-in)	
		ALUVIAL	Formación Inguapala (N-g)	
MIOCENO	MESTOGENIA	ALUVIAL	Formación Inguapala (M-in)	
		ALUVIAL	Formación Inguapala (M-g)	
		ALUVIAL	Formación Inguapala (M-i)	
		ALUVIAL	Formación Inguapala (M-s)	
PACUENARIO	MESTOGENIA	ALUVIAL	Formación Inguapala (Ps-m)	
		ALUVIAL	Formación Inguapala (Ps-m)	
PERMIANO	MESTOGENIA	ALUVIAL	Formación Inguapala (Ps-m)	
		ALUVIAL	Formación Inguapala (Ps-m)	
MESOZOICO	MESTOGENIA	ALUVIAL	Formación Inguapala (Ps-m)	
		ALUVIAL	Formación Inguapala (Ps-m)	
CENOZOICO	MESTOGENIA	ALUVIAL	Formación Inguapala (Ps-m)	
		ALUVIAL	Formación Inguapala (Ps-m)	

Figura 7.7.2 Plano de ubicación geográfica y geológica de la estación de Chachapoyas (CHA). Se muestra las fuentes de ruido indicadas con la numeración dentro de un círculo de color amarillo en el recuadro del mapa. El triangulo rojo indica la ubicación de la estación.

### **7.7.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico**

Para el análisis correspondiente a las variaciones diurnas del nivel de ruido se han tomado registros de una hora para la mañana (6:00 a.m.), medio día (12:00), tarde, (18:00 p.m.) y media noche (12:00) para los días 15 de Febrero, 16 de Mayo, 15 de Agosto y 13 de Noviembre del año 2004. Según las Figuras 7.7.3 y 7.7.4 para el rango de frecuencias entre 3 a 10 Hz. se observa que las variaciones en amplitud son del orden de 6 a 7 dB, siendo mayores durante el día. Es posible que estas variaciones se deban a la influencia del ruido cultural debido a que la estación CHA, se encuentra cerca de algunas localidades y a 5 Km de la ciudad de Chachapoyas, además de la acción del viento y la presencia de árboles en las cercanías de la estación (Figura 7.7.1)

En la Figura 7.7.4d se observa que en el rango de frecuencias de 6 a 8 Hz. existe un pico de ruido con mayor amplitud durante el día, posiblemente sea debido a la presencia de lluvias y viento en el área.

En el rango de bajas frecuencias (0.1 a 1 Hz) no se observan variaciones significantes en la amplitud del ruido; sin embargo, ellas se encuentran cercanas a la curva de mínimo nivel de ruido propuesta por Peterson (1993). Para las bajas frecuencias en el rango de 0.01 a 0.1 Hz, El nivel de ruido es alto y cercano a la curva de alto nivel de ruido propuesta por Peterson (1993), lo cual como ya se dijo estaría relacionado a las condiciones locales de la presión atmosférica.

### **7.7.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico.**

A continuación se procede a analizar las variaciones de los niveles de ruido con respecto a los cambios estacionales durante el año 2002 (Figura 7.7.5). Para el rango de frecuencias entre 1 a 10 Hz se observa variaciones en las amplitudes del orden de 8 a 10 dB siendo mayores durante la primavera e invierno, lo cual podría deberse al incremento del viento en estas épocas del año. Para rangos de frecuencias de 0.5 a 0.9 Hz. se observa la presencia de un pico que podría tener su origen en las oscilaciones producidas por el mar. Para ruidos de baja frecuencia (0.01 a 0.1 Hz.), el nivel de ruido es alto y esto se explicaría si se considera que la estación se encuentra ubicada casi en la superficie del terreno y el sensor soporta las fluctuaciones locales de la presión atmosférica.

### VARIACION DIURNA

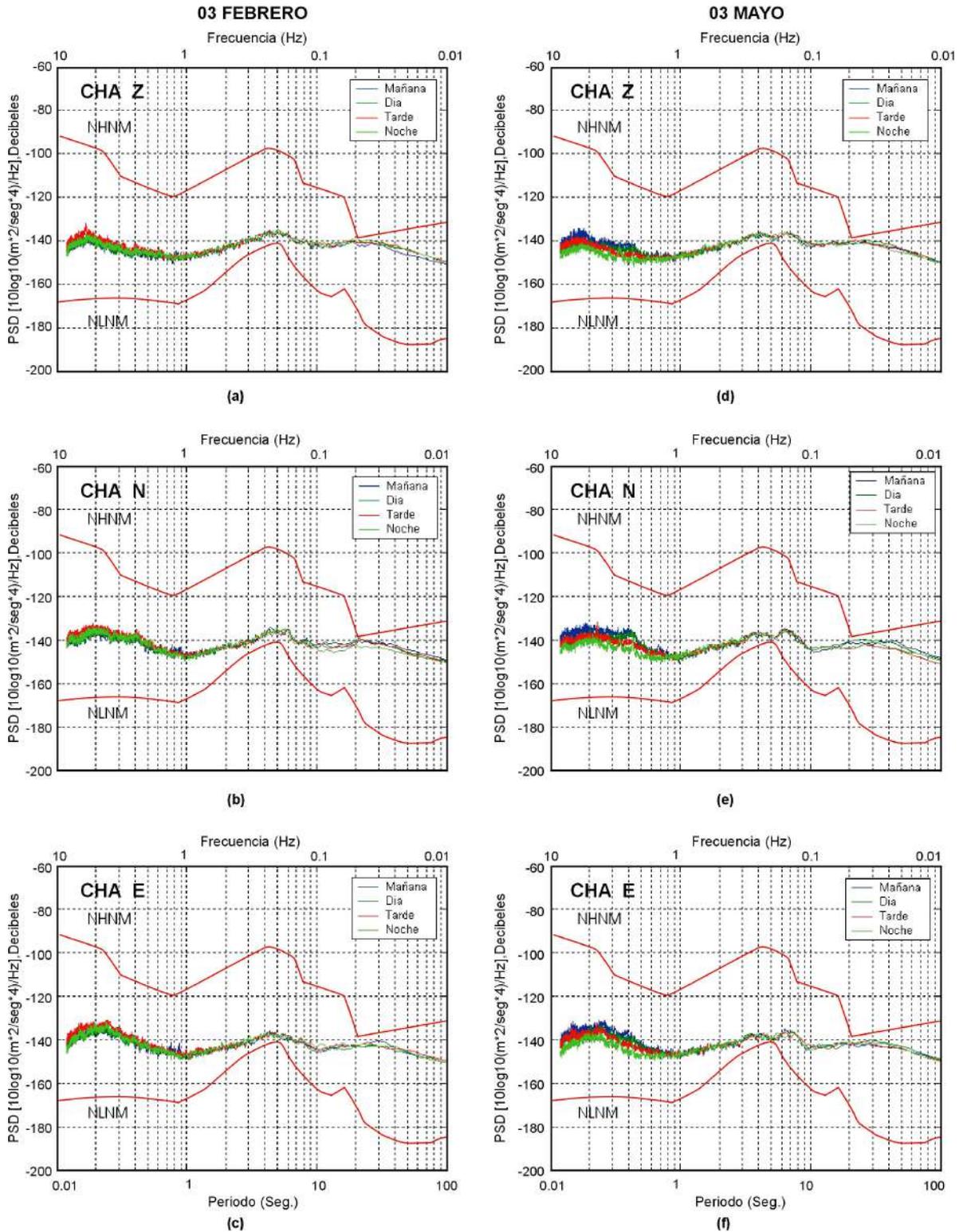


Figura 7.7.3 Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación CHA, para un día de los meses de Febrero y Mayo del año 2004. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHNM y NLNM según Peterson (1993).

### VARIACION DIURNA

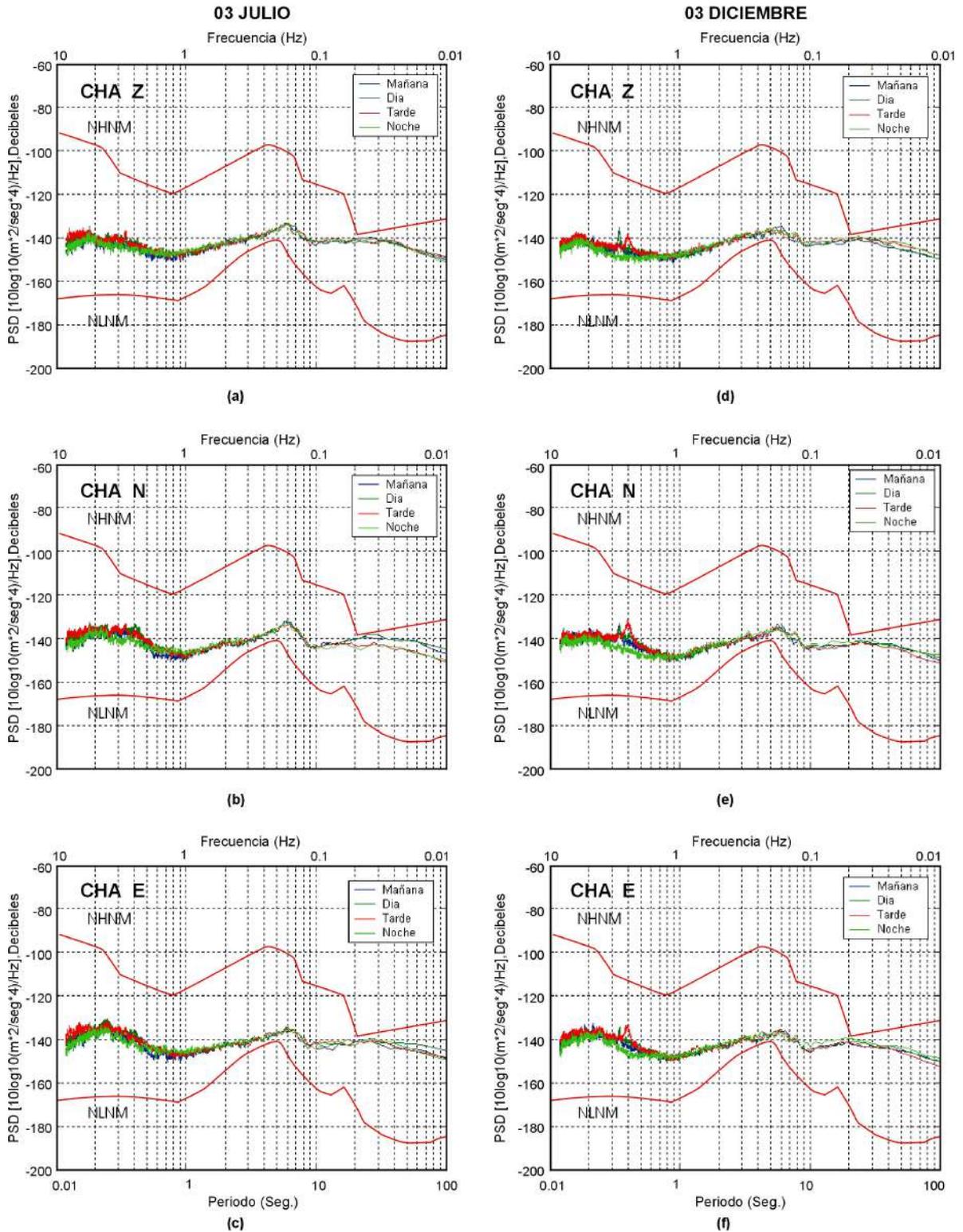


Figura 7.7.4 Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación CHA, para un día de los meses de Julio y Diciembre del año 2004. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHNM y NLNM según Peterson (1993).

### VARIACIÓN ESTACIONAL

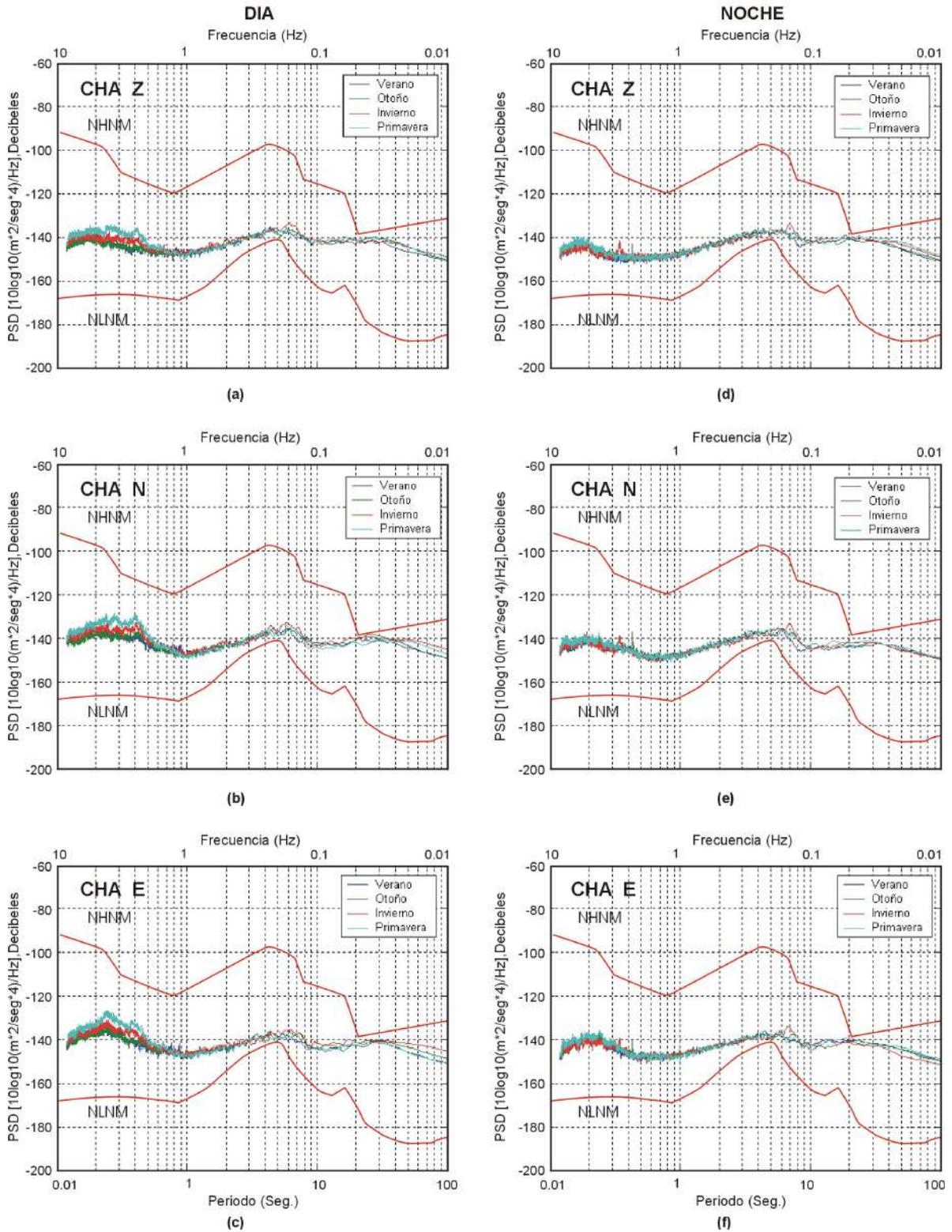


Figura 7.7.5 Variación estacional de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes (N, E y Z) de la estación CHA, para el día y la noche del año 2004. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHHM y NLNM según Peterson (1993).

### 7.7.5 Variación por Componente de Registro

Las curvas de PSD se obtienen al calcular el promedio anual cada una de las componentes (N, E y Z) y su análisis permite considerar lo siguiente (Figura 7.7.6): Se observa que para las altas frecuencias entre 1 y 10 Hz. las componentes horizontales (N y E) presentan mayores amplitudes de ruido que la componente Vertical Z, esto sería debido a la influencia del ruido cultural y a la acción del viento en los alrededores de la estación. Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. no se observan variaciones entre las tres componentes; sin embargo, la amplitud del nivel de ruido es bajo cercana a la curva de mínimo nivel de ruido propuesta por Peterson (1993).

Para el rango de frecuencias de 0.01 a 0.09 Hz. se observa que las 3 componentes son casi iguales en amplitud y presentan alto nivel de ruido, el origen posible de estos niveles de ruido ya fueron discutidos.

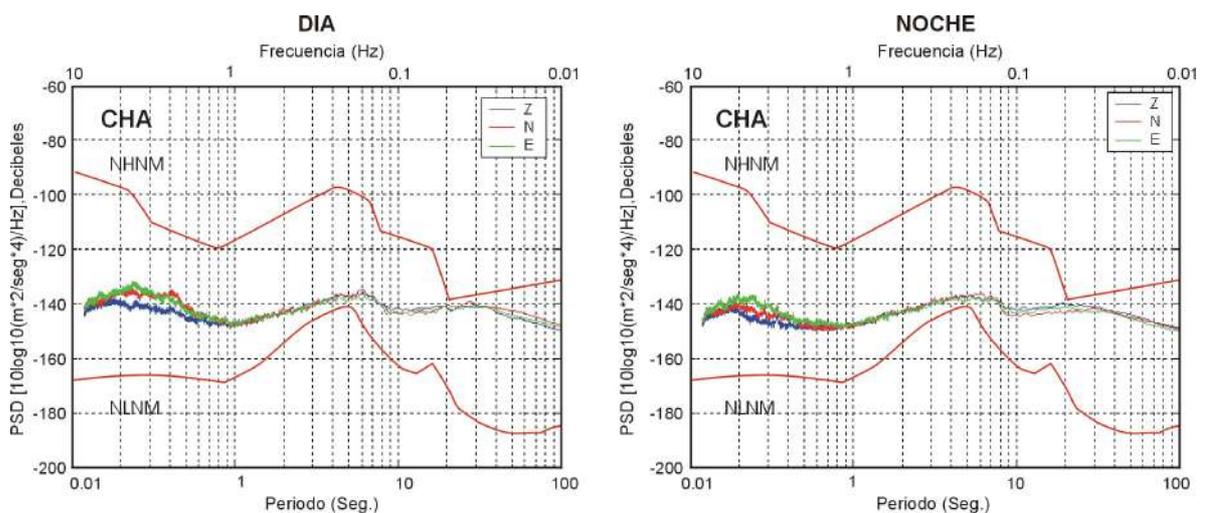
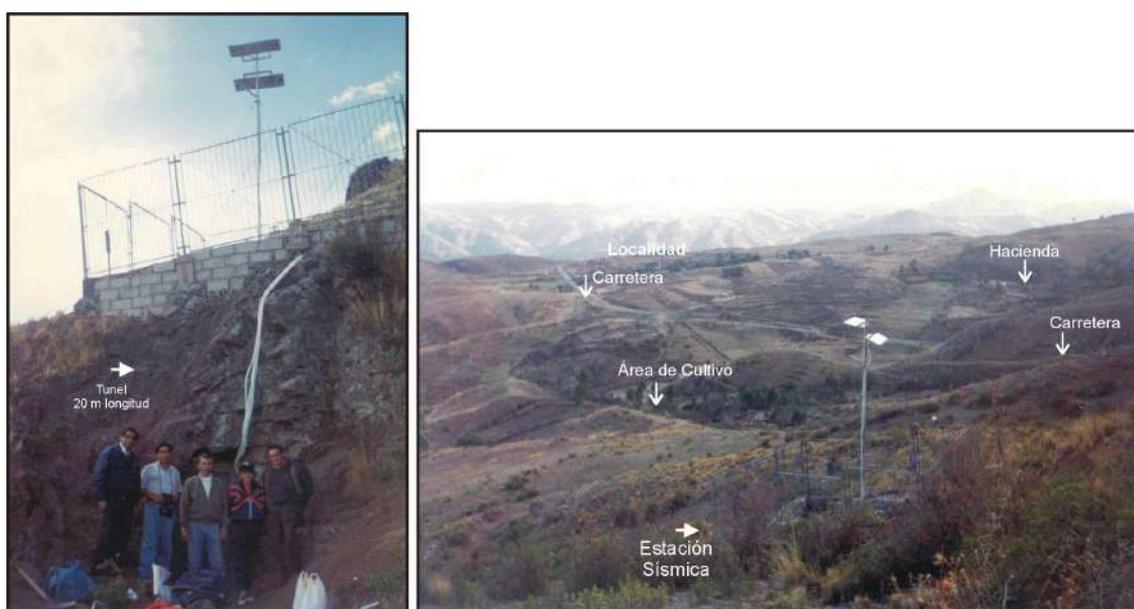


Figura 7.7.6 Promedio anual de los niveles de ruido sísmico presente en las 3 componentes N, E y Z de la estación CHA. Las curvas de PSD corresponden al promedio obtenido para el día y la noche del año 2004.

## 7.8 Estación Sísmica de Cusco (CUS)

La estación sísmica de la Cusco, fue puesta en funcionamiento en Noviembre de 1996 en el Departamento de Cusco, a 4 Km. al Norte de la ciudad del Cusco con las siguientes coordenadas geográficas Latitud 13.478° S y Longitud 71.979° W y elevación 3858 m. Los instrumentos, tanto el de adquisición (sensor) como el de registro (registrador) se encuentran ubicados sobre una loza en el interior de un pequeño túnel de 20 m de longitud, tal como se muestra en la Figura 7.8.1



*Figura 7.8.1 La imagen muestra la posición de la estación respecto al tipo de suelo y el túnel en la cual se encuentra el sensor de la esta estación sísmica Cusco (CUS), así como las posibles fuentes de ruido de alta frecuencia.*

### 7.8.1 Geología

Geomorfológicamente, el área en el cual se encuentra ubicada la estación sísmica presenta un relieve ondulado con una serie de montañas y valles interandinos típicos de la cordillera andina; Así mismo, se encuentra la presencia de fallas activas como la Falla inversa de Tambomachay ubicada al norte de la estación sísmica (Figura 7.8.2.).

En la zona, la red hidrográfica esta representada por los principales afluentes (riachuelos y lagunillas) que forman parte de la cuenca del río Vilcanota el cual se encuentra al NE de la estación. El drenaje presenta un control estructural-litológico, ya que la dirección de los principales ríos esta en concordancia con el sistema

preferencial e fallamientos, fracturamientos ó flexiones (Mendivil y Dávila, 1994), (Carlotto y Gil, 1996).

La falla Tambomachay forma parte del sistema de fallas activas que tienen una dirección N-S y se ubica al N de la ciudad del Cusco; es decir, pone en contacto las formaciones del grupo Yuncaypata con las del Grupo San Jerónimo. Esta falla se encuentra activa en la actualidad. El sensor sísmico de la estación CUS se encuentra ubicado sobre rocas sedimentarias de la formación Quilque y Chilca, en la parte inferior consiste de lutitas, areniscas rojizas y conglomerados y en la parte superior, lutitas rojas con láminas de yeso y areniscas calcáreas del Paleozoico.

### **7.8.2 Clima**

Debido a su posición geográfica y a la diversidad de relieves, los factores climáticos varían considerablemente de un lugar a otro y aún más durante el día ó la noche, con características propias. Al igual que en toda la sierra del Sur del Perú, en esta área las precipitaciones atmosféricas se producen en su mayoría en el Verano austral; es decir, en el lapso comprendido de Diciembre a Marzo. Cabe anotar que durante los últimos años han ocurrido notables variaciones no solo en cuanto a este tipo de fenómenos, si no en el clima en general, presentándose aun en el invierno austral abundante granizada y aguaceros. La Temperatura es muy variable entre el día y la noche, siendo los meses de Junio y Julio los mas fríos llegando afuera de los valles aun por debajo de los 6° C formando las denominadas “heladas” que causan serios prejuicios a la agricultura.

### **7.8.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico**

Para el análisis correspondiente a las variaciones diurnas del nivel de ruido se han tomado registros de una hora para la mañana (6:00 a.m.), medio día (12:00), tarde (18:00 p.m.) y media noche (12:00) para los días 05 de Febrero, 05 de Abril, 05 de Julio y 05 de Noviembre del año 2002. Los resultados se presentan en las Figuras 7.8.3 y 7.8.4 siendo sus características las siguientes:

Para el rango de las altas frecuencias entre 1 a 10 Hz. se observan variaciones

## MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN DE CUSCO - CUS

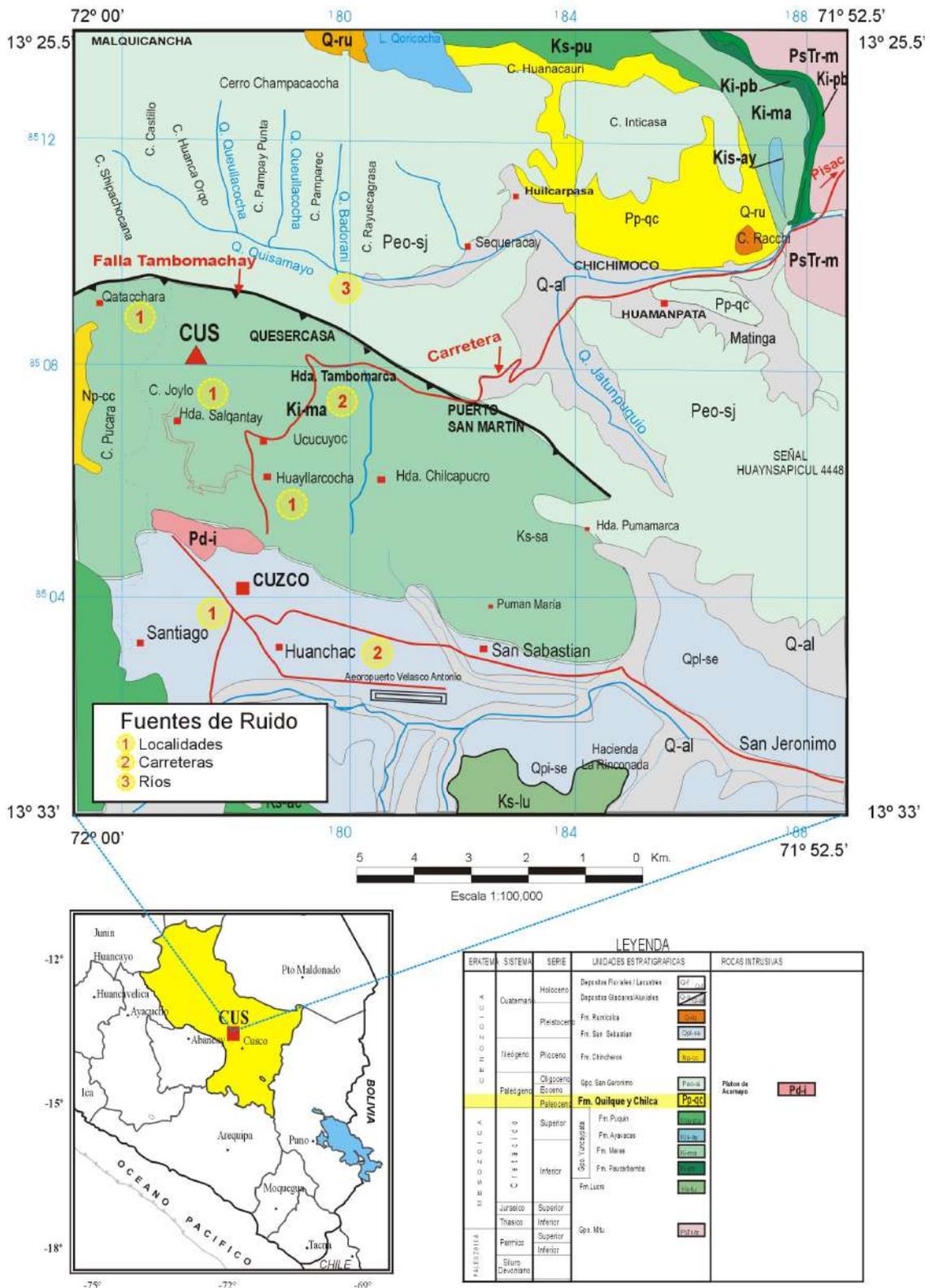


Figura 7.8.2 Plano de ubicación geográfica y geológica de la estación de Cusco (CUS). Con círculos enumerados se indica las principales fuentes de ruido en el recuadro del mapa. El triángulo rojo indica la ubicación de la estación.

en las amplitudes de los niveles de ruido en el orden de 14 dB, siendo mayor en las horas del día y las mínimas en la noche. Estos niveles de ruido posiblemente se deban al ruido cultural producido por las localidades cercanas, a las carreteras y áreas de cultivo próximas a la estación sísmica.

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. no se observan variaciones diurnas significantes y el nivel de ruido esta cercana al mínimo establecido por Peterson (1993). Para las bajas frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. no se observan variaciones significantes estando las amplitudes del nivel de ruido en la parte media de los niveles máximo y mínimo propuestos por Peterson (1993). Estos niveles de ruido son óptimos y quizás se deba a que la estación esta en el interior de un túnel de 20 m de longitud y sobre roca dura.

#### **7.8.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico**

A continuación se procede a analizar las variaciones de los niveles de ruido con respecto a los cambios estacionales para el año 2002. Se ha considerado comparar los niveles de ruido para las horas más ruidosas durante el día, y las menos ruidosas durante la noche (Figura 7.8.5). Se observan para el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz. pequeñas variaciones en la amplitud del ruido durante la estación de invierno, lo cual posiblemente se deba a que en esta época del año se incrementan los vientos, además del ruido cultural debido a que cerca de la estación existe una carretera de transito vehicular moderado.

En el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. no se observan variaciones significantes, posiblemente se deba a que la estación sísmica se encuentra en el continente y alejado del océano pacifico y las curvas están cerca al nivel mínimo definido por Peterson (1933). Para la banda de frecuencias de 0.1 a 0.4 Hz. se observa que la amplitud del ruido se incrementa la amplitud en razón de 7 a 8 dB. y posiblemente se debería al paso de aguas subterráneas en el área debido a que existen gran cantidad de canales incas.

Para el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. se observa que el nivel de ruido se mantiene estable y bajo durante todo el año; es decir, las curvas están cerca al nivel mínimo definido por Peterson (1993). Es posible que esto se deba a que el sensor se encuentre ubicado dentro de un túnel de 20 m de longitud y sobre roca dura, lo que hace posible que disminuyan los efectos de la presión atmosférica.

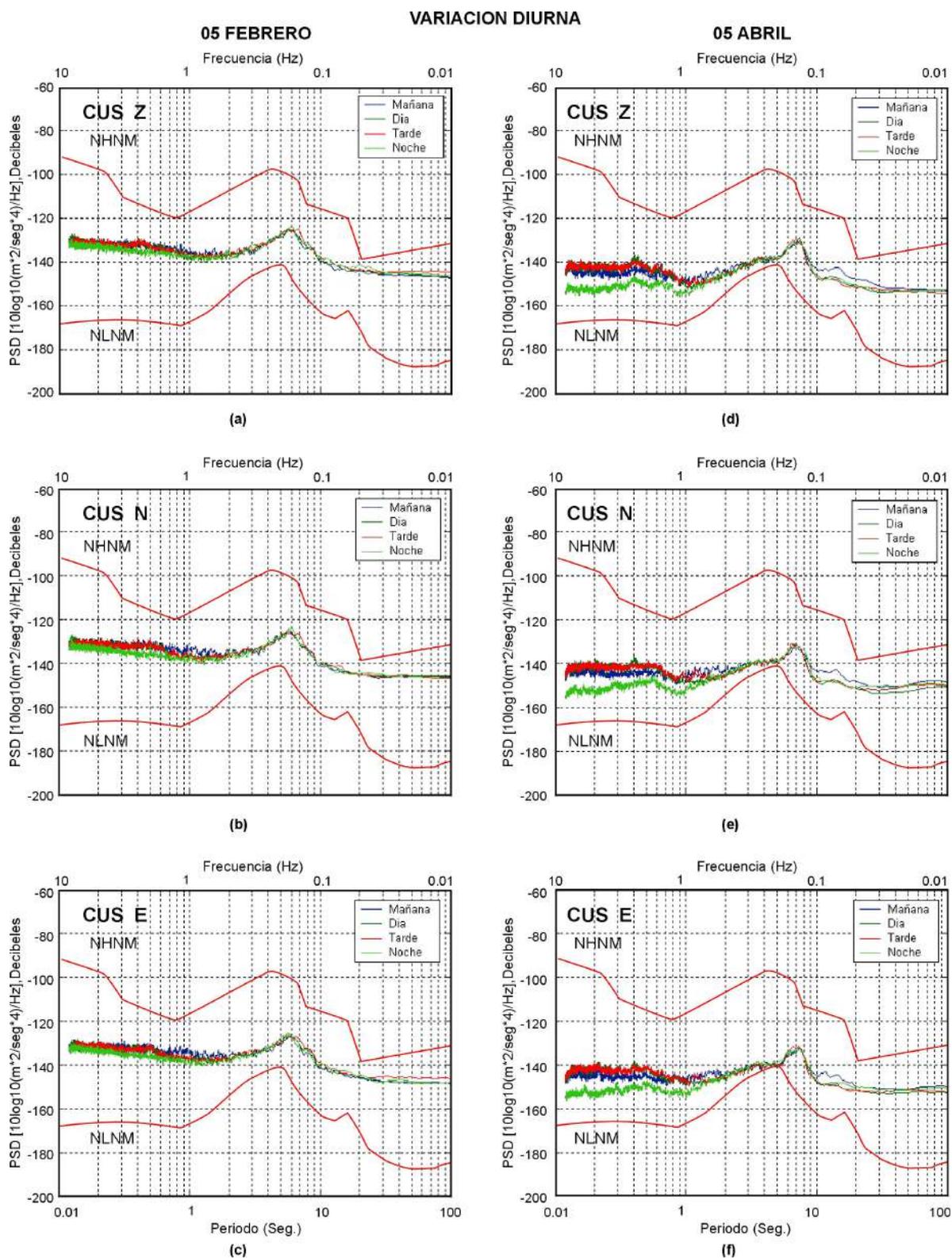


Figura 7.8.3 Muestra la variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación de CUS, para un día de los meses de Febrero y Abril del año 2002. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHHM y NLNM según Peterson (1993).

VARIACION DIURNA

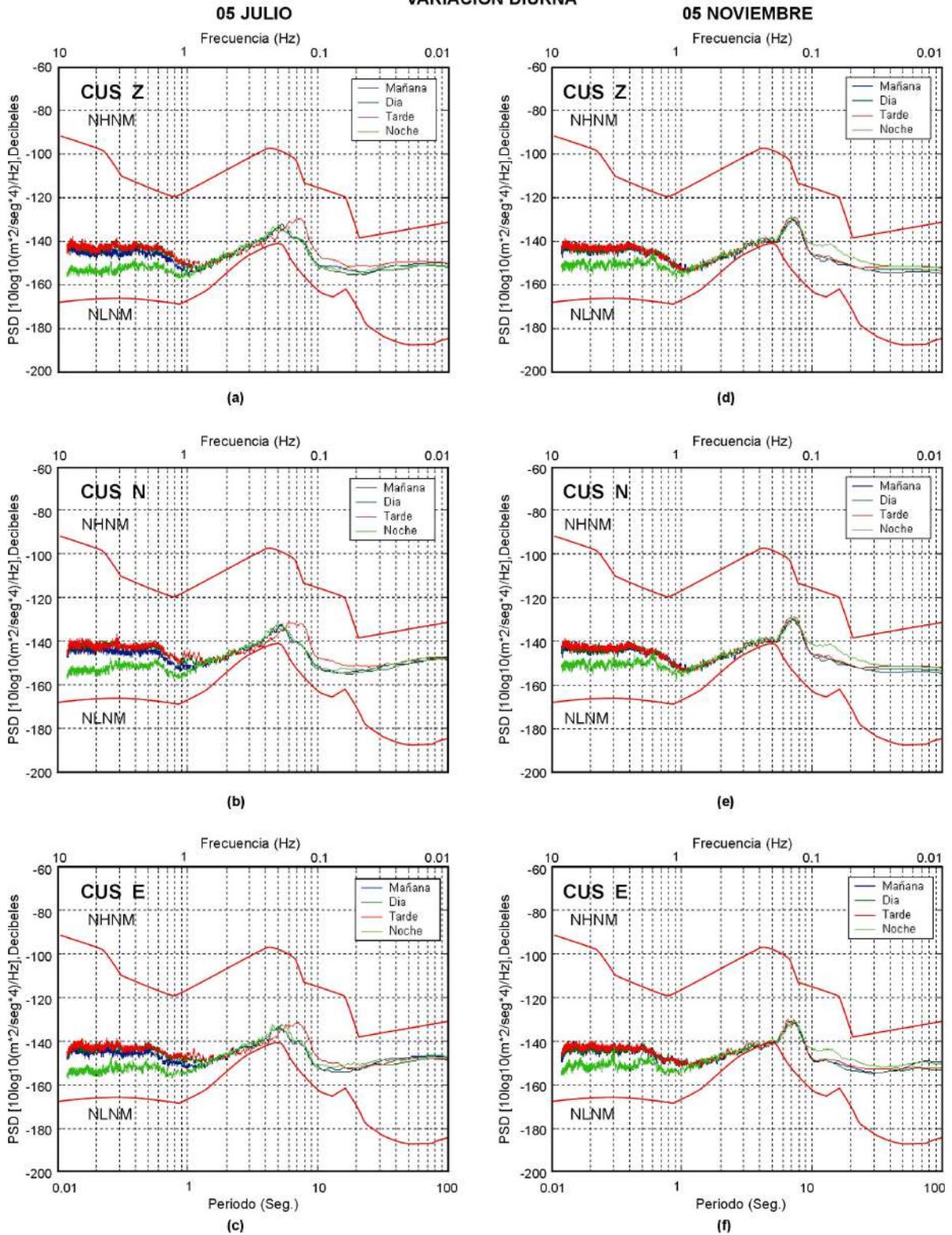


Figura 7.8.4. Muestra la variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación de CUS, para un día de los meses de Julio y Noviembre del año 2002. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHNM y NLNM según Peterson (1993).

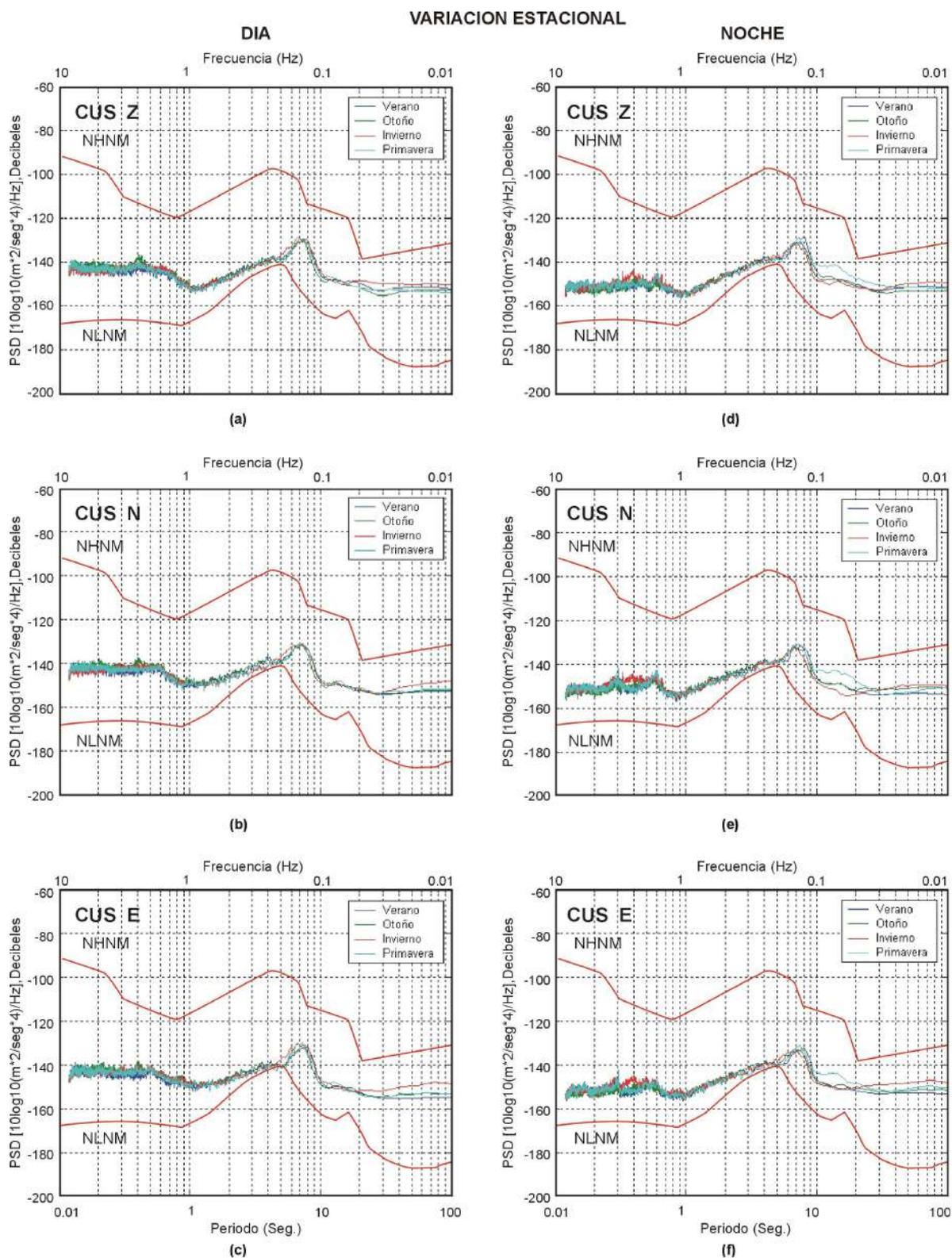


Figura 7.8.5 Variación estacional de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes (N,E y Z) de la estación CUS, para el día y la noche del año 2002. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHHM y NLNM según Peterson (1993).

### 7.8.5 Variación por Componente de Registro

Las curvas de PSD que se obtienen al calcular el promedio anual para cada una de las componentes de registro (N, E y Z) se muestran Figura 7.8.6 y en ella se observa que para el rango de frecuencias entre 1 a 10 Hz. no existen variaciones entre las componentes de registro, pero si la amplitud del ruido es mayor en el día y menor en la noche en el orden de 15 dB.

Para el rango de frecuencias 0.1 a 1 Hz. no se observan variaciones en el nivel del ruido entre las tres componentes y posiblemente se deba a la ubicación geográfica de la estación; es decir, en el interior del continente y alejada del océano. Así mismo, para el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. no se observan variaciones, probablemente se deba a que el sensor esta ubicado en túnel donde la influencia de la presión atmosférica se ve disminuida.

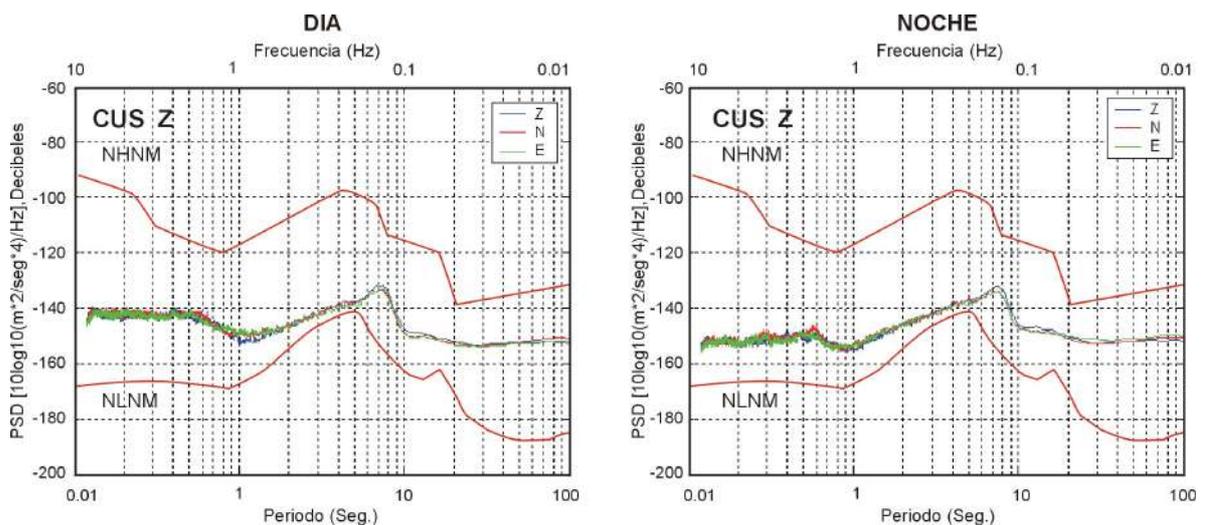
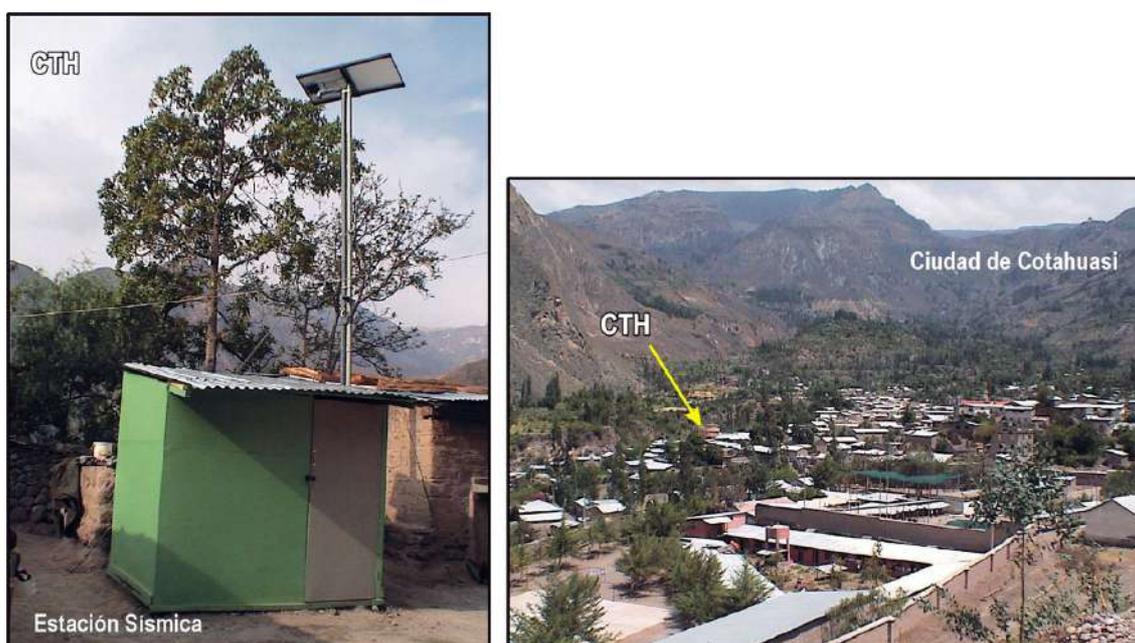


Figura 7.8.6. Promedio anual de los niveles de ruido sísmico presente en las 3 componentes (N, E y Z) de la estación del CUS. Las curvas de PSD corresponden al promedio obtenido para el día y la noche del año 2002.

## 7.9 Estación Sísmica de Cotahuasi (CTH)

La estación sísmica de Cotahuasi fue puesta en funcionamiento en Diciembre del 2004 en el Departamento de Arequipa, Provincia de la Unión en la misma ciudad de Cotahuasi con las siguientes coordenadas geográficas: Latitud 15.210° S y Longitud 72.890° W y elevación 2680 m. El sensor sísmico y el registrador se encuentran ubicados en el interior de una caseta sobre un pilar de concreto armado construido en la superficie del terreno, tal como se muestra en la Figura 7.9.1



*Figura 7.9.1 Ubicación de la estación de Cotahuasi (CTH). Obsérvese el tipo de suelo aluvial sobre el cual se encuentra la estación CTH, además de la presencia de árboles y su ubicación con respecto a la ciudad.*

### 7.9.1 Geología

Geomorfológicamente (Figura 7.9.2), la zona de estudio presenta un relieve con características propias de las zonas de alta cordillera. El modelado tiene un control estructural y litológico, donde los factores climatológicos e hidrográficos han jugado un papel muy importante. Los ríos de la zona pertenecen a la cuenca hidrográfica del pacífico y tienen un régimen estacional. El río de Cotahuasi y sus afluentes constituyen un drenaje transversal que sugiere un control estructural. El modelado por acción fluvial indica que la mayor parte de la cuenca se encuentra en estadio juvenil con fuerte pendiente y desarrollo de valles en V y valles encañonados (Olchanski y Dávila, 1994).

El sensor sísmico de la estación CTH, se encuentra ubicado sobre depósitos aluviales cuaternarios recientes formados por arcillas, conglomerados y gravas. Estos depósitos son terrazas que se han formado en las laderas de los ríos y se encuentran sobreyacendo a importantes formaciones del terciario Gpo. Tacaza (brechas volcánicas, ignimbritas y lavas) y el cretácico Fm. Arcurquina (Calizas grises), (Figura 7.9.2).

### **7.9.2 Clima**

El clima en el área de Cotahuasi varía con la altitud y su posición geográfica, y es regido por los cambios estacionales. Durante la estación lluviosa, comprendida entre de Diciembre y Abril, la temperatura fluctúa entre 0º y 10º C, pero en Junio y Agosto como consecuencia de la estación invernal, la temperatura es inferior a 0º C. La actividad humana tiene mayor desarrollo en los valles hasta una altura de 3,800 m.s.n.m. en donde los pobladores se dedican principalmente a la agricultura y ganadería.

### **7.9.3 Variación Diurna de los Niveles de Ruido Sísmico**

Para el análisis correspondiente a las variaciones diurnas del nivel de ruido se han tomado registros de una hora para la mañana (6:00 a.m.), medio día (12:00), tarde (18:00 p.m.) y media noche (12:00) para los días 01 de Febrero, 01 de Junio, 01 de Agosto y 01 de Octubre del año 2005 y los resultados se presentan en las Figuras 7.9.3 y 7.9.4, siendo sus principales características las siguientes:

Para las altas frecuencias (1 a 10 Hz.), se observa que los niveles de ruido presentan una variación diurna con amplitudes entre 15 a 16 dB, siendo mayores en horas del día y las menores en las noches. En este rango de frecuencias el nivel de ruido esta próximo a la curva de máximo nivel de ruido propuesta por Peterson (1993). Posiblemente estos niveles de ruido tienen su origen en la estación sísmica se encuentra ubicada en la misma ciudad de Cotahuasi y es posible que tipo de roca sobre el cual esta colocado el sensor sísmico (material aluvial) también contribuya en el incremento del nivel de ruido (Figura 7.9.1).

### MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN DE CCOTAHUASI - CTH

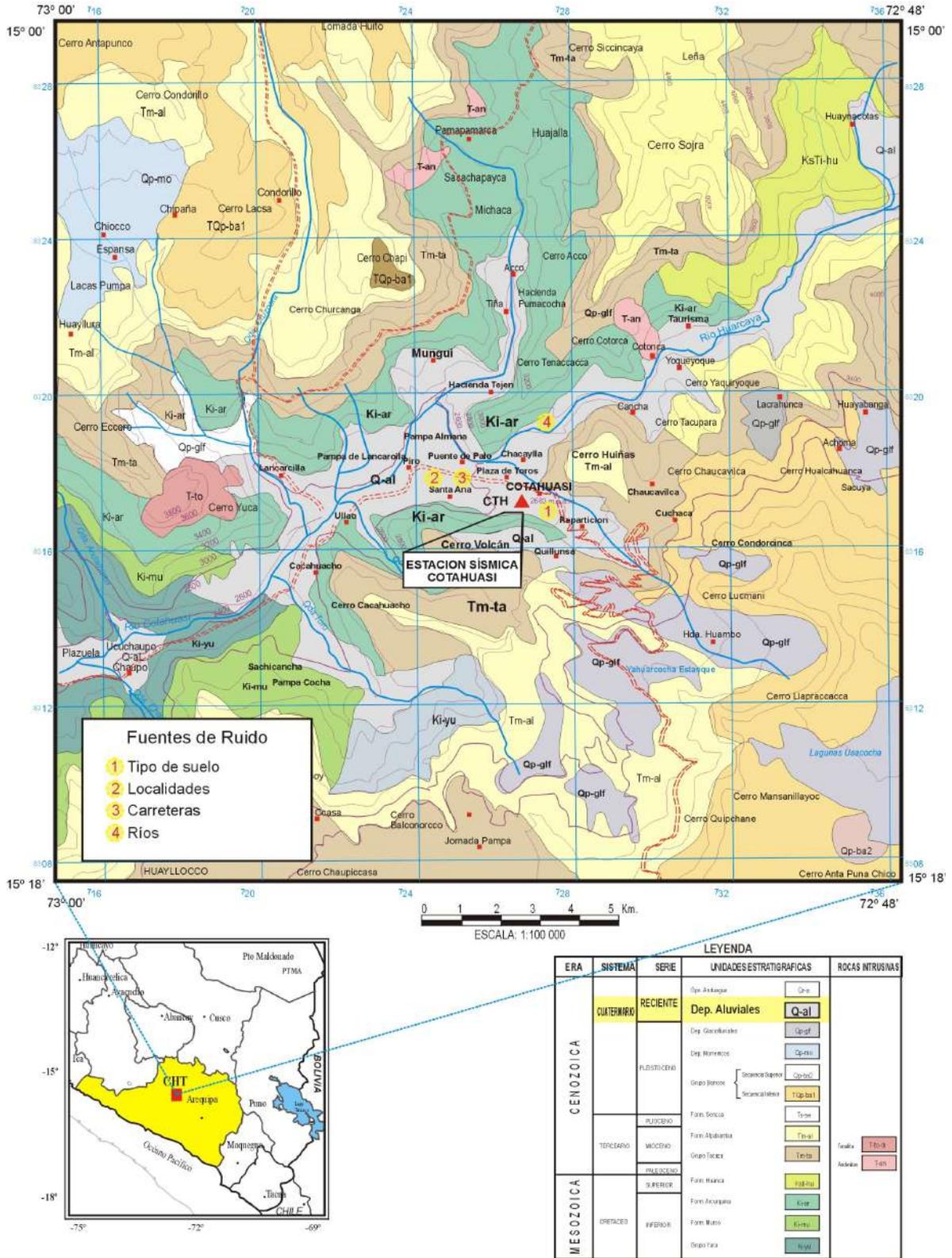


Figura 7.9.2 Plano de ubicación geográfica y geología en los alrededores de la estación de CTH. Con círculos enumerados se indican las principales fuentes de ruido en el recuadro del mapa. El triángulo rojo indica la ubicación de la estación.

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. no existen variaciones significantes entre las amplitudes del ruido, sin embargo, se observa la presencia de un pico pronunciado que podría tener su origen en los ruidos naturales causados por las ondas oceánicas provenientes de las oscilaciones del mar; sin embargo, ellas se encuentran cercanas al nivel mínimo establecido por Peterson (1993).

Para el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz, las amplitudes del ruido sobrepasan los niveles máximos propuestas por Peterson (1993), siendo mayor en las componentes horizontales, lo cual se debería a los efectos de las fluctuaciones locales de la presión atmosférica que afecta directamente al sensor ya que la estación se encuentra en superficie.

#### **7.9.4 Variación Estacional de los Niveles de Ruido Sísmico**

A continuación se evalúan las variaciones de los niveles de ruido con respecto a los cambios estacionales durante el año 2005 (Figura 7.9.5). Para el rango de frecuencias entre 1 y 10 Hz. se observa variaciones en las amplitudes del orden de 7 a 9 dB, siendo mayores en las estaciones de Primavera e Invierno, lo cual podría deberse al incremento de los vientos en la zona en estas épocas del año lo que hace posible que se aumente el nivel de ruido existente.

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz. se observan variaciones estacionales del orden de 10 dB. siendo de mayores amplitudes en las componentes horizontales durante las estaciones de Verano y Primavera, lo cual podría deberse a los ruidos naturales producidos por las oscilaciones del mar en el océano debido al incremento de tormentas y vientos en esta época del año ocasionados por al anticiclón del Pacífico Sur.

Para ruidos de baja frecuencia (0.01 a 0.1 Hz.), el nivel de ruido es alto y sobrepasa a la curva de máximo nivel propuesta por Peterson (1993), esto se explicaría si se considera que la estación se encuentra ubicada casi en la superficie del terreno, sobre material aluvial y soporta las fluctuaciones locales de la presión atmosférica que incrementa el nivel de ruido.

VARIACION DIURNA

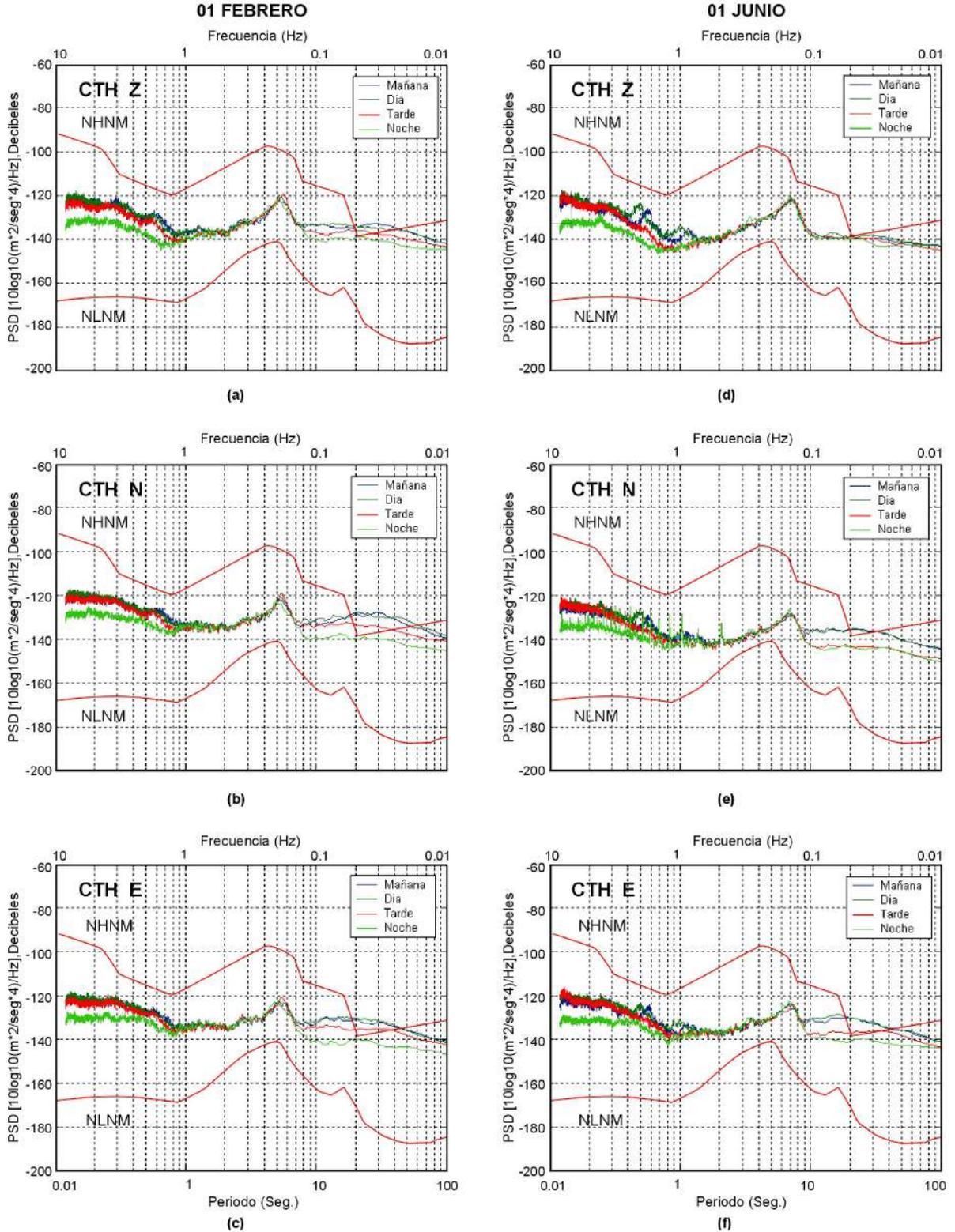


Figura 7.9.3. Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación CTH, para un día de los meses de Enero y Junio del año 2005. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHHM y NLNM según Peterson (1993).

VARIACION DIURNA

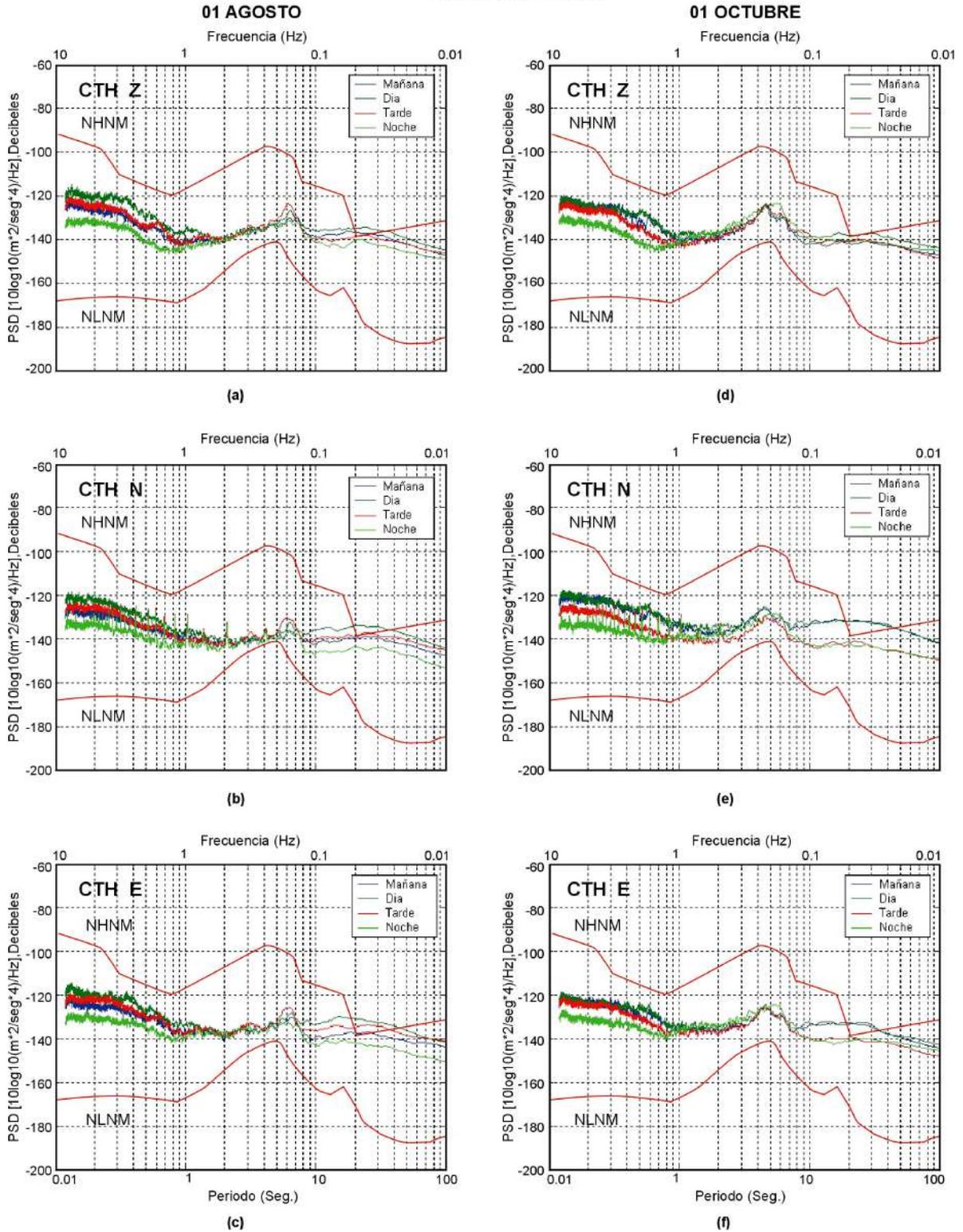


Figura 7.9.4. Variación diurna de los niveles de ruido en las 3 componentes (Z, N y E) de la estación CTH, para un día de los meses de Agosto y Octubre del año 2005. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHNM y NLNM según Peterson (1993).

VARIACION ESTACIONAL

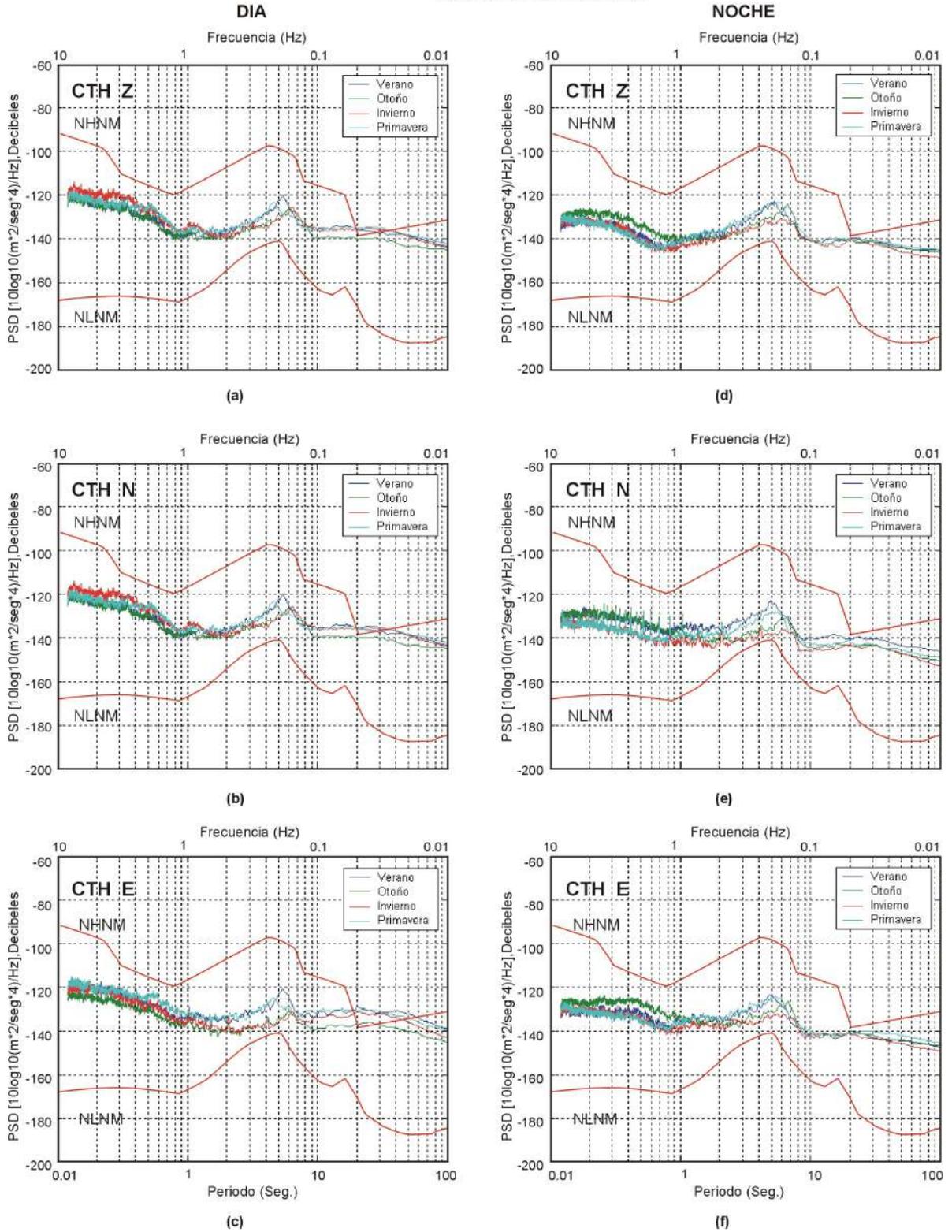


Figura 7.9.5. Variación estacional de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes (N,E y Z) de la estación CTH para el día y la noche del año 2005. Las curvas de color rojo corresponden a los niveles NHHM y NLNM según Peterson (1993).

### 7.9.5 Variación por Componente de Registro

Las curvas de PSD que se obtienen al calcular el promedio anual en cada una de las componentes (N, E y Z) se muestran en la Figura 7.9.6. y en ella se observa que para el rango de frecuencias entre 1 y 10 Hz las componentes horizontales (N y E), son las que presentan mayores amplitudes en los niveles de ruido y es causado por la presencia del ruido cultural y los vientos.

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz, las componentes Z y E presentan mayores amplitudes del nivel de ruido que la componente N, esto sería posible debido a las amplificaciones de las ondas sísmicas por el tipo de suelo aluvial sobre la que se encuentra la estación.

En el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz. se observa que los niveles de ruido son mas altos en las componentes horizontales N y E. en esta banda de frecuencia el nivel de ruido es alto., como ya se dijo podría deberse a las fluctuaciones locales de la presión atmosférica.

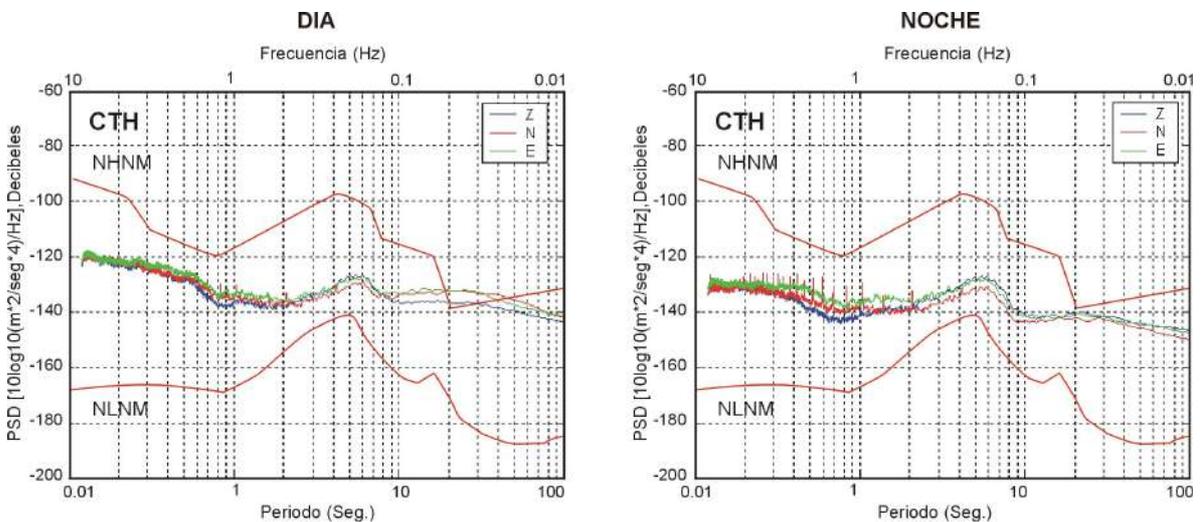


Figura 7.9.6 Promedio Anual de los niveles de ruido sísmico de las 3 componentes (N,E y Z) de la estación CTH. Las curvas de PSD corresponden al promedio obtenido para el día y la noche del año 2005.

## 7.10 Comparación de todas las estaciones de la R.S.N.

Para una mejor evaluación de los resultados obtenidos en este estudio se ha visto por conveniente agrupar en la Figura 7.10.1 los PSD correspondientes a las horas en las cuales se ha observado los mayores niveles de ruido en cada estación y por lo general, corresponden a las 12:00 horas del día. De acuerdo a esta figura de concluye lo siguiente.

**Para los ruidos de alta frecuencia entre 1 a 10 Hz:** Las estaciones que presentan mayores amplitudes entre si del nivel de ruido son: CTH, seguida por la estación de PUC y luego CAJ, con variaciones del orden de 25 dB con respecto a las estaciones de CUS, LYA y CHA. Estas variaciones son debidas a que las primeras ubicadas en superficie y sobre suelos poco compactos y las segundas sobre roca y en el interior de túneles como en el caso de CUS. En estas la amplificación de los niveles de ruido tiene una relación directa con la influencia del ruido cultural causado por la cercanía de la estación a las fuentes de ruido (ciudades, carreteras, campos de cultivo, centros mineros, etc). Las estaciones de CHA, LYA y CUS, presentan bajo nivel de ruido con amplitudes están cercanas a la curva de mínimo nivel de ruido establecida por Peterson (1993).

**Para frecuencias entre 0.1 a 1 Hz:** Dentro de este rango de frecuencias se observa que todas las estaciones presentan niveles de ruido cercanos al mínimo establecido por Peterson (1993), aunque es notoria la presencia de algunas perturbaciones del orden de 8 dB en relación al menor valor observado en la estación CUS. En general, dentro de este rango de frecuencias los ruidos podrían tener su origen en el tipo de suelo sobre el cual opera el sensor (CTH y PUC) o por sus cercanías a la costa (TOQ, YLA, CAJ).

**Para el rango de frecuencias entre 0.01 a 0.1 Hz.:** En general, todas las estaciones presentan altos valores de amplitud y casi cercanas al máximo propuesto por Peterson (1993) con variaciones entre ellas en un rango de 18 dB. Aquí, las diferencias son claras entre la estación del CUS, que al estar en el interior de un túnel, presenta menores valores de amplitud del ruido que la estación de CTH que se encuentra sobre la superficie. Para este rango de frecuencias, el ruido es asociado a las fluctuaciones de la presión atmosférica que hace que la tierra se comporte como una masa elástica y que genera perturbaciones de muy bajas frecuencias.

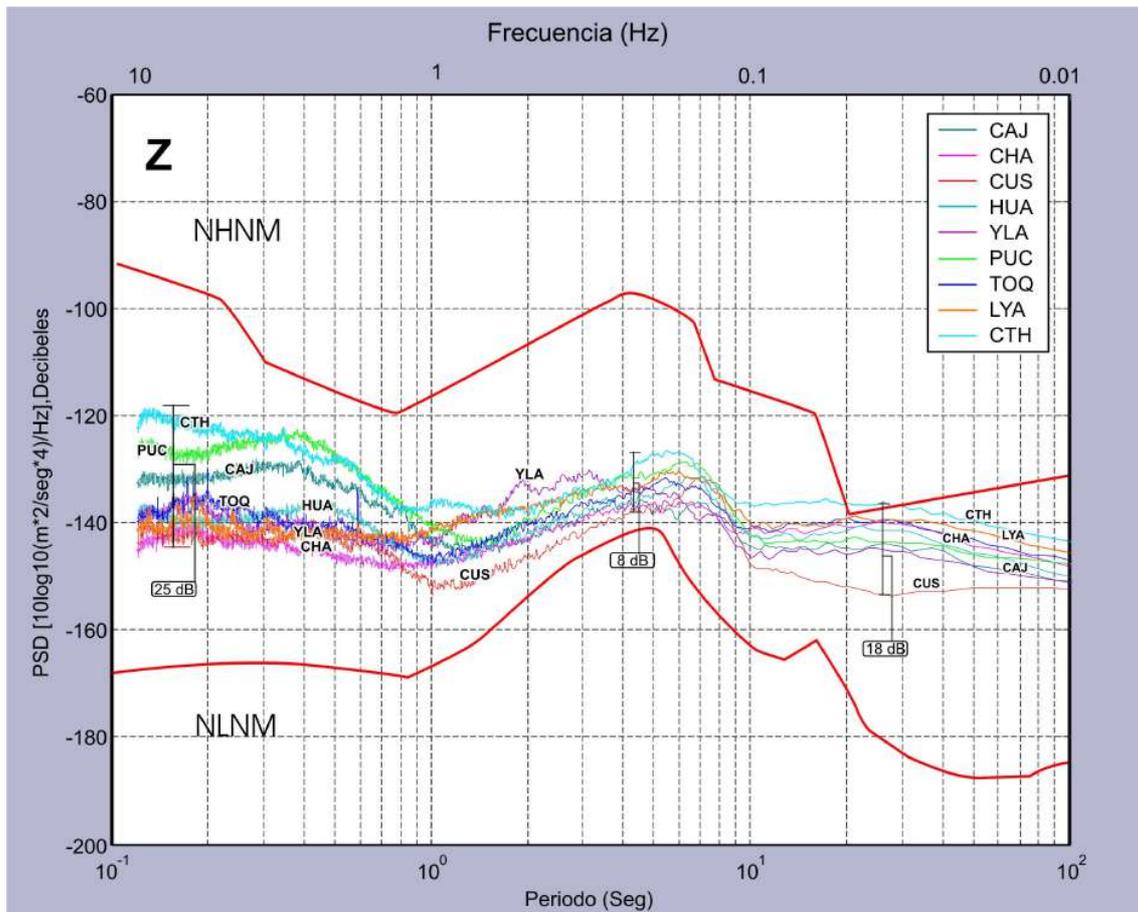


Figura 7.10.1 Se muestra el PSD obtenido para el total de estaciones de banda ancha utilizadas en este estudio. Las curvas de PSD corresponden a la componente vertical (Z), obtenida para las 12 horas del medio día.

El análisis y la evaluación del nivel de ruido que se registra en cada una de las nueve estaciones sísmicas de banda ancha consideradas en este estudio, han permitido conocer, de acuerdo al rango de frecuencias de interés, que su calidad dependerá básicamente si la estación se encuentra en roca o en el interior de túneles. El conocimiento obtenido sobre los niveles de ruido facilitará la explotación de la data sísmica a utilizarse en los diversos estudios de investigación que se realizarán en el IGP en razón a que se podrá escoger adecuadamente un determinado tipo de filtro ha aplicarse en base a la relación señal/ruido.

## CAPITULO VIII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio del análisis de los niveles de ruido en las estaciones sísmicas de banda ancha que integran la R.S.N. ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. Se ha estudiado el nivel de ruido sísmico presente en 9 estaciones de banda ancha de la R.S.N. que vienen funcionando desde 1996. La calidad del registro de la señal sísmica ha sido analizada dentro de una banda de frecuencias de 0.01 a 10 Hz. Las curvas de Densidad de Potencia Espectral (PSD) han representado ser una herramienta útil para evaluar la calidad de la señal sísmica e identificar las frecuencias en las cuales predominan los diferentes tipos de ruidos.
2. Para los ruidos con frecuencias comprendidas entre 1 y 10 Hz, sobre la línea base de 140 dB, varían hasta en 25 dB y estarían relacionados con la cercanía de la estación sísmica a centros poblados, carreteras, campos de cultivo, centros mineros (ruido cultural) y por el tipo de suelo sobre el cual se encuentran los sensores sísmicos, además de otras condiciones locales como el viento y la lluvia. Este tipo de ruido esta presente con mayor amplitud en las estaciones de CTH, PUC y CAJ.
3. En el rango de bajas frecuencias de 0.1 a 1 Hz, se observa que la mayoría de las estaciones presentan niveles de ruido cercanas al mínimo establecido por Peterson (1993), debido a que están ubicadas en continente y las variaciones en las amplitudes dependen de la posición geográfica de cada una de las estaciones, siendo esta mas alta en las que se encuentran cerca del Océano Pacífico (LYA, TOQ y YLA) y bajas para las que se encuentran alejadas como CUS y HUA (sierra) y CHA en la selva. El origen de estos ruidos son atribuidos a las ondas oceánicas producidas por las oscilaciones naturales del mar.
4. En la banda de frecuencias 0.01 a 0.1 Hz, todas las estaciones presentan altos valores de amplitud, casi cercanas al nivel máximo propuesta por Peterson (1993) y variando entre ellas en un rango de 18 dB. Aquí, las diferencias son claras entre las estaciones sísmicas que se encuentran en túneles (CUS y

CAJ) que presenta menores valores y las que se encuentran en superficie (LYA, CHA, CTH, etc.) presentan altos valores para los niveles de ruido. En general, para este rango de frecuencias el ruido está asociado a las fluctuaciones de la presión atmosférica que hace que la Tierra se comporte como una masa elástica que genera perturbaciones de muy baja frecuencia.

5. El conocimiento obtenido sobre los niveles de ruido presentes en las estaciones sísmicas de banda ancha facilitará la explotación de la data sísmica a utilizarse en los diversos estudios de investigación en razón que se podrá escoger adecuadamente un determinado tipo de filtro a aplicarse en base a la relación señal/ ruido.
6. Se recomienda en el futuro, hacer pruebas de análisis de los niveles de ruido antes de proceder a instalar una estación sísmica de banda ancha, para así poder conocer y determinar la relación señal/ruido del registro sísmico y el comportamiento del suelo respecto a las principales de fuentes de ruido.
7. Es recomendable instalar los sensores sísmicos de banda ancha en túneles, cavernas y pozos, sobre roca dura y alejada de las fuentes de ruidos naturales y artificiales; solo así será posible obtener datos sísmicos de alta calidad y una buena relación señal/ruido.
8. Para eliminar el efecto del ruido atmosférico en los registros de banda ancha, sería recomendable registrar las fluctuaciones de la presión atmosférica con un microbarómetro durante el tiempo de registro de la data sísmica y se corrige mediante el proceso de deconvolución de los datos de presión a la data sísmica.
9. A pesar que resulta difícil poder cumplir con todos los requisitos y seguir el procedimiento adecuado para la instalación de una estación sísmica, es importante realizar la evaluación de sus niveles de ruido a fin de proceder a asignar un determinado valor de calidad a la señal que se registra.
10. En la actualidad la Red Sísmica Nacional se ha incrementado con 6 estaciones sísmicas de banda ancha y sus niveles de ruido serán evaluados con el procedimiento propuesto en este estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

Aki, K. y Richards, P. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, Vol. I. *New York*. Pags 491-497

Beauduin, P., P. Lognonne, J. Montagner, S. Cacho, J. Karczewski, y M. Morand (1996). The effects of atmospheric pressure changes on seismic signals, or how to improve the quality of a station, *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 1760–1799.

Bellido, E. (1979). Boletín N° 15 Geología de los Cuadrángulos de Moquegua Hoja 35-u, *Ingemmet*.

Berger, J. y Eissler H. K., (1988). Studies of high-frequency seismic Noise in Eastern Kazakhstan, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 78, No. 5, pp. 1744–1758.

Bormann, P., Klinge, K., y Wylegalla, K.(1997). Analysis of broadband seismic noise at the German Regional Seismograph Network and search for improved alternative station sites, *Journal of Seismology*, 1, 357-381.

Butler, R. y Lay T. (2004). The Global Seismographic Network Surpasses Its Design Goal, *Eos*, Vol. 85, No. 23, pp. 225–232

Carlotto, V. y Gil W. (1996). Boletín N° 65 Serie A: Carta Geológica Nacional Geología de Los Cuadrángulos de Urubamba y Calca Hoja: 27-s. *Ingemmet*.

Cooley, J.W., y J.W. Tukey (1965), An algorithm for machine calculation of complex Fourier series, *Math. Comp.*, 19, 297-301.

Chavarria, L. y Susagna, T. (1998), Caracterización del ruido sísmico en emplazamientos de la red sísmica de Catalunya con sensor de banda ancha, (PDF-190KB). 1ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almería, 9-13 de febrero de 1998

De la Cruz, N. (1997). Boletín N° 102 Geología de los Cuadrángulos San Roque, Río Callería, San Lucas, Pucallpa, Nuevo Utiquinua, Cantagallo y divisor Yurva Ucayali. Hoja: 17-n, *Ingemmet*.

Gershanik, S. (1996). Sismología, Fac. Cs. Astronómicas y Geofísicas UNLP, Pgs. 291-294.

Hasselmann, K. (1963). A statistical analysis of the generation of microseisms, *Rev. Geophys.* 1, 177–209.

Jaén, H. y Ortiz G. (1963). Boletín N° 6 Geología de los Cuadrángulos de la Yarada y Tacna Hoja: 37-u, *Ingemmet*.

Kennett, B.L.N. (2003). The Seismic Wavefield, Volume I: Introduction and Theoretical Development. *Cambridge Vol I, 8-17*.

Longuet-Higgins, M.S. (1950). A theory of origin of microseism, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 243,1-35.

McNamara, D. y Raymond P. Buland (2003), Ambient Noise Levels in the Continental United States, USGS, Golden, CO *Manuscript in review: Bull. Soc.Seism. Am. September 2003*.

Megard, F. (1997). Boletín N ° 18 Geología de los Cuadrángulos de Huancayo Hoja 25-m *Ingemmet*.

McCreery, C. S., F. K. Duennebie, and G. H. Sutton (1993). Correlation of deep ocean noise (0.4–20 Hz) with wind, and the Holu spectrum, a world-wide constant, *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 2639–2648.

Mendivil, S. y Dávila D. (1994).Boletín N° 52 Serie A: Carta Geológica Nacional Geología de los Cuadrángulos de Cuzco y Livitaca Hoja 28-s. *Ingemmet*

Muller, T., y W. Zurn (1983). Observation of gravity changes during the passage of cold fronts, *J. Geophys.* 53, 155–162.

Nicolae, M. y Eugen D. (2002) Site effects on the seismic waves spectra, *Revue Roumanie de Geophysique*, 46, p. 97-106.

Olchauski. E. y Dávila D. (1994). Boletín N° 50 Geología de los Cuadrángulos de Chuquibamba y Cotahuasi Hoja 31-q. *Ingemmet*.

Payo, G., (1986), Introducción al Análisis de Sismogramas. Monografías 3 del Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de la Presidencia. Madrid, España.

Peterson, J. (1993). Observation and modelling of seismic background noise. U.S. Geol. Surv. Tech. Rept., 93-322, 1-95.

Pierson, W. J., y L. Moskowitz (1963). A proposal spectral for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kiaigorodskii, *J. Geophys. Res.* 69, 5181–5190.

Ramirez, J. E. (1940). An experimental investigation of the nature and origin of microseisms at St. Louis, Missouri, *Bull. Seism. Soc. Am.* 30, 35–84.

Reyes, L. (1980). Boletín N° 31 Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba Hoja: 15-g, *Ingemmet*.

Reyes, W. (1995). Boletín N° 60 Geología de los Cuadrángulos de Pallasca, Tayabamba, Corongo, Pomabamba, Carhuaz y Huari Hoja 18-h, *Ingemmet*.

Stutzmann, E, G. Roul, y Astiz L.,(2000), Geoscope Station Noise Levels. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 3, pp. 690–701.

Sánchez, A. F. (1995). Boletín N° 56 Geología de los Cuadrángulos de Bagua Grande, Jumbilla, Lonya Grande, Chachapoyas, Rioja, Laimebamba y Bolivar Hoja: 13-h *Ingemmet*.

Sorrells, G. G., (1971). A preliminary investigation into the relationship between long-period seismic noise and local fluctuations in the atmospheric pressure field, *Geophys. J.R. Astr. Soc.* 26, 71-82.

Sorrells, G. G., J. A. McDonald, Z. A. Der, and E. Herrin (1971). Earth motion caused by local atmospheric pressure changes, *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 26, 83–98.

Scherbaum, F. (1996) Of Poles and Zeros Fundamentals of Digital Seismology, *Princeton University*.

Tavera, H. y E. Buforn (1998), Sismicidad y Sismotectónica del Perú. Física de la Tierra 10, 187-219. UCM.

Udiaz, A. y Mezcuca J. (1986). Fundamentos de Geofísica, Alhambra, España.

Wilson D.y Joseph L. (2002). Broadband Seismic Background Noise at Temporary Seismic Stations Observed on a Regional Scale in the Southwestern United States, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 92, No. 8, pp. 3335–3341.

Webb, S. C. (1998). Broadband seismology and noise under the ocean, *Rev. Geophys.* 36, 105–142.

Zurn, W., and R. Widmer (1995). On noise reduction in vertical seismic records below 2 mHz using local barometric pressure, *Geophys. Res. Lett.* 22, 3537–3540.

## EL RUIDO SÍSMICO DE FONDO

**ELARD CUTIPA VARGAS**

*Escuela Profesional de Ingeniería Geofísica  
Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa  
elard\_cc@axil.igp.gob.pe  
elardcutipa99@hotmail.com*

*Prácticas dirigidas por: Dr. Hernando Tavera  
Centro Nacional de Datos Geofísicos*

### RESUMEN

En el presente informe se hace una revisión de las principales causas que dan origen a la presencia del ruido sísmico de fondo en los registros sísmicos obtenidos de la Red sísmica Nacional del Perú a cargo del IGP. y así como del método desarrollado para evaluar dichos niveles de ruido. El ruido sísmico de fondo se genera principalmente por el ruido cultural (actividad humana), microsismos (olas del mar y tormentas oceánicas) y vibraciones producidas por el viento. Algunos investigadores consideran que el ruido de origen natural esta generada por ondas superficiales que se forman en zonas de interacción océano-continente, modos fundamentales de vibración del planeta, cambios en la presión atmosférica y actividad volcánica interna.

### INTRODUCCIÓN

La interpretación de los registros sísmicos requiere de un buen entendimiento de la generación y propagación de las ondas sísmicas y la influencia de los procesos de registro de cada impulso y su impresión sobre el sismograma. Gracias a los avances en el mejoramiento en la calidad de la instrumentación sísmica ahora es posible obtener un optima interpretación del movimiento de la partícula en el sensor sísmico en forma digital y sobre un amplio rango de frecuencias. El uso de datos de banda ancha requiere una cuidadosa atención a la naturaleza de la componente desorganizada del movimiento sísmico, comúnmente conocido como *ruido*. (Kennet, 2001).

Tradicionalmente, el ruido ha sido considerado como algo negativo, molesto y que hay que cancelar o evitar, En la actualidad, lo que hasta hace pocas décadas era un estorbo en los estudios de propagación y atenuación de ondas sísmicas se ha convertido en una excelente herramienta para caracterizar los efectos locales (geología) y las propiedades dinámicas del lugar de registro y de las estructuras, Así como también resultan muy útiles para propósitos de control de calidad de los registros obtenidos por las redes sísmicas, Así pues para los estudios de la vibración ambiental, el ruido es la señal y las ondas que lo integran se suelen llamar en inglés, “microtremors”; en castellano no hay uniformidad en el nombre aplicado y se usan con el mismo

significado las palabras microtemblores ó microtrepidaciones.

El ruido sísmico de fondo puede definirse como:

- a) Vibraciones en la superficie de la tierra debida a la influencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía.
- b) Una superposición de ondas superficiales que constituyen un campo estacionario y homogéneo y están relacionadas a los ruidos de baja frecuencia y de periodo largo.
- c) Ruido ambiental generado por el tráfico vehicular o la actividad humana y están relacionados con los ruidos que presentan alta frecuencia.

## **NATURALEZA DEL RUIDO SÍSMICO DE FONDO**

La superficie de la tierra se encuentra en un constante y leve movimiento que puede ser detectado con sismómetros sensitivos. El movimiento de la tierra va desde efectos locales, tales como las perturbaciones hechas por el hombre (ruido cultural) y las oscilaciones de los árboles por el viento, o vibraciones inducidas por procesos, tales como microsismos generados por tormentas distantes.

Existe un amplio rango de contribuciones al ruido de fondo existente que incluyen la

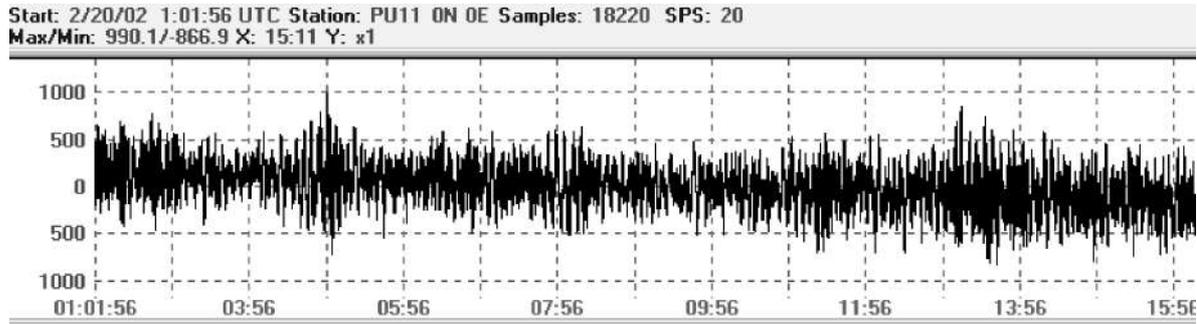
presencia de mareas, presión atmosférica, efectos diurnos principalmente asociados con la variación de la temperatura y la actividad inducida por el hombre. La suma de estos tipos de ruido afecta de manera importante en la calidad de los registros sísmicos, de allí que cuando se procede a instalar una estación sísmica es importante evitar la influencia de las fuentes de ruido sísmico, las estaciones sísmicas ya establecidas con el tiempo sufren de incremento del ruido debido a las actividades realizadas por el hombre y a las expansiones de las ciudades.

El ruido sísmico de fondo ocurren en el intervalo de frecuencias de 0.001 a 30 Hz, sin embargo, para realizar estudios de sismología; es necesario realizar el análisis de los niveles de ruido sísmico en estaciones de registro y en este caso interesa el ancho de banda comprendido entre 0.001 a 10 Hz, ya que en esta banda de frecuencias parte de la energía se transmite como ondas superficiales, que frecuentemente son usadas para estimar las propiedades físicas de la corteza terrestre y aquellas que se transmite como ondas de cuerpo pueden ser usadas para estimar las características de las estructuras geológicas sobre las cuales se encuentra situada la estación.

Por ejemplo, el registro del ruido sísmico de fondo que se muestra en la Figura 1, fue obtenida de la estación sísmica digital de banda ancha Pucallpa (PUC) que forma

parte de la Red Sísmica Nacional del Perú (RSN). En dicha figura se observan la presencia de altas frecuencias con amplitudes casi homogéneas, aunque es

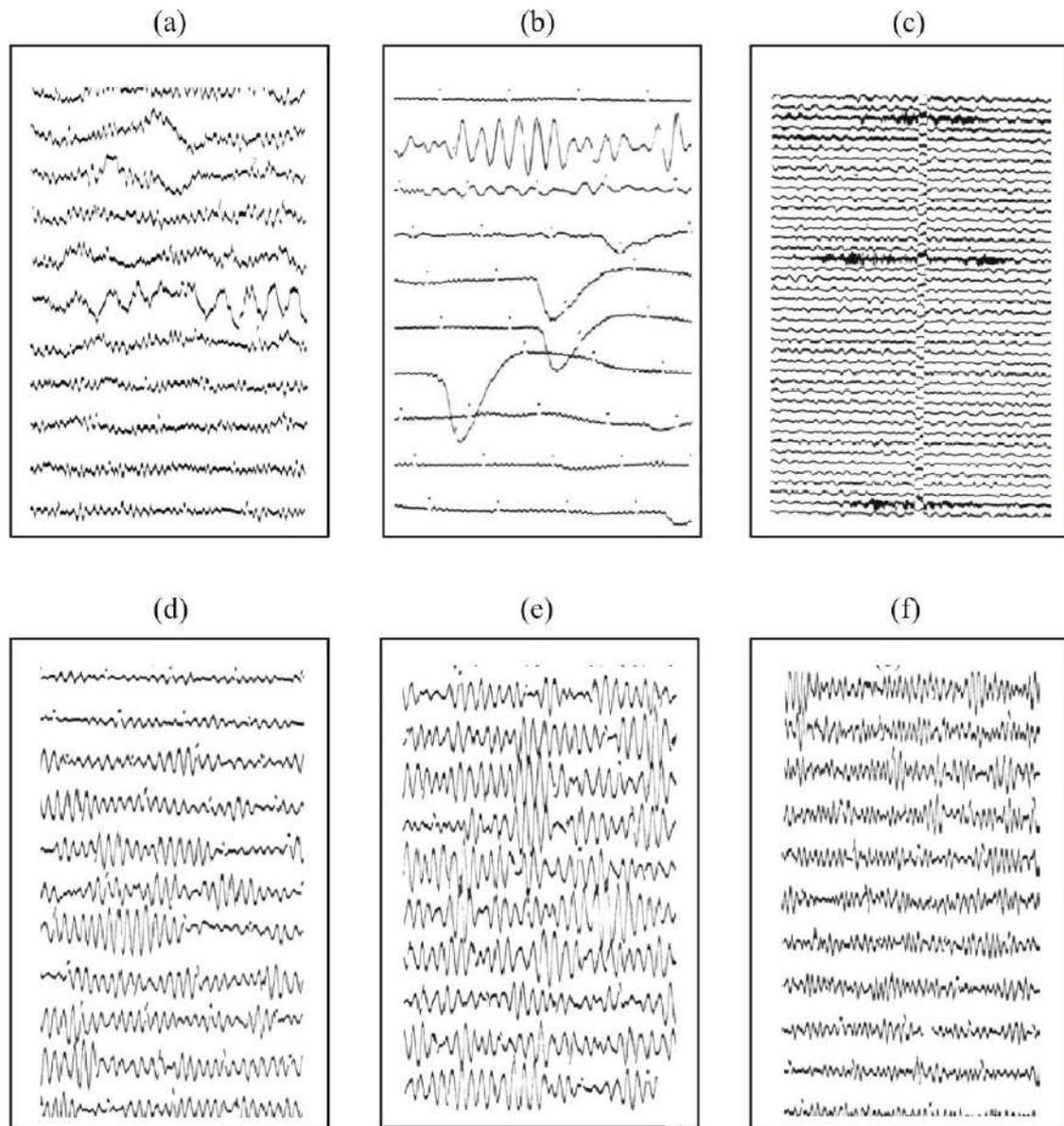
fácil distinguir algunos trenes de onda de poca duración. En este registro no es posible observar ruidos de periodo muy largo.



*Figura 1. Ruido de fondo de la componente vertical de la estación PUC de la RSN. La ventana de registro tiene una duración de 14 min, y corresponde a las 08:01:56 horas del día 20 de febrero del año 2002.*

En general, muchos autores han estudiado y evaluado las características del ruido, así como su origen y rangos de frecuencia predominantes. En la Figura 2, se presenta algunos ejemplos de ruido por Payo (1986); a) viento intenso, b) impulso relacionado con una posición incorrecta del sistema de registro c) tráfico y (d, r y f) las llamadas tormentas microsísmicas causadas por borrascas meteorológicas (frente que separa dos masas de aire contiguas una caliente y otra fría). En este último caso, el periodo parece estar relacionado con la velocidad de desplazamiento del centro de la borrasca y con la región oceánica en la que avanza mientras que las amplitudes son función de la profundidad de la borrasca.

Uno de los métodos fundamentales para evaluar los niveles de ruido sísmico en una red de estaciones sísmicas, es calculando la densidad de la potencia espectral (PSD) para una señal transitoria generada por el ruido sísmico de fondo y luego compararlo con las curvas de referencia proporcionadas por Aki y Richards (1980). Estas curvas (Figura 3) definen la densidad de potencia espectral representativas del ruido sísmico en condiciones de bajo nivel de ruido (Quiet) y alto nivel de ruido (Noisy), para una estación típica situada en un emplazamiento de roca dura, alejada de actividades antropogénicas y en ausencia de fuerte viento.



**Figura 2.** Ejemplos de Ruido de fondo presente en los sismogramas y que pueden ser originados por diferentes causas: (a) Viento, (b) Mecánico, (c) Cultural, (d), (e) y (f) microsismos (Payo 1986).

Según la Figura 3, en el espectro del ruido fondo se puede identificar 2 picos importantes, el primero a una frecuencia de 0.14 Hz ( $T = 4-8$  s) y otro cerca de 0.07 Hz ( $T=10-16$  s).

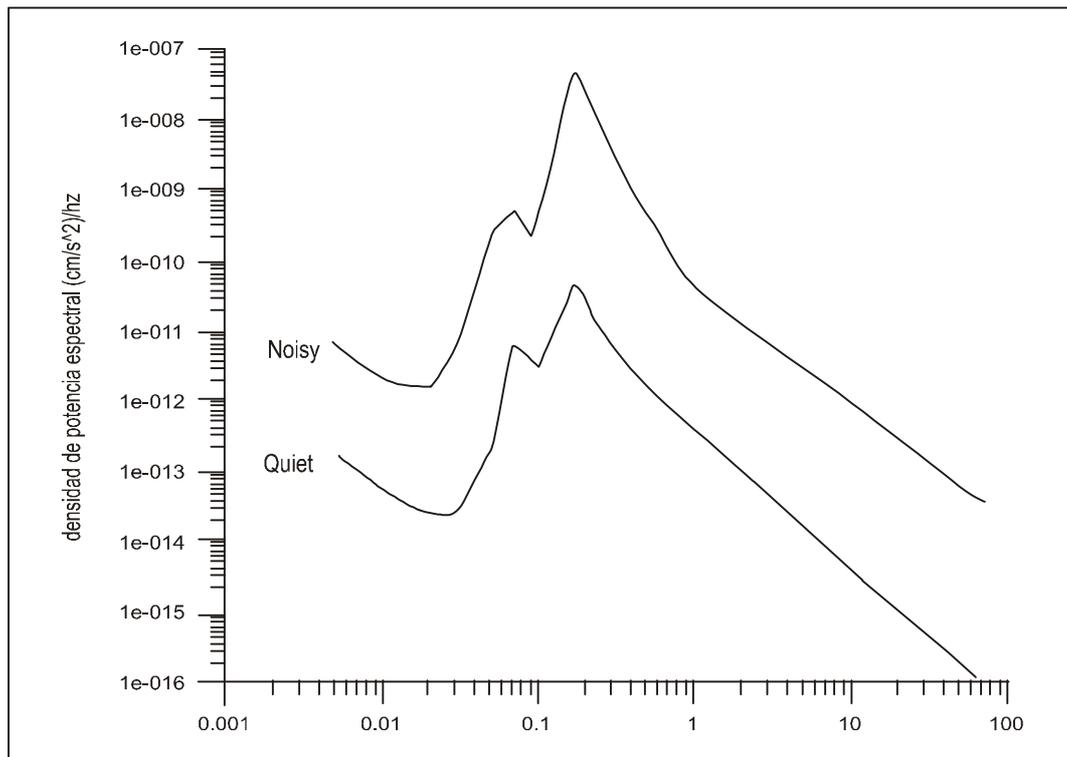
En general, parece que ambos picos son debidos a las ondas oceánicas. Los picos mas pequeños ocurren en las frecuencias primarias en las cuales muchas de las

ondas oceánicas son observadas. (Wiechert, 1904). El pico principal de la Figura 3, fue explicado por Longuet-Higgins en 1950 como debido a la presión de las ondas oceánicas, las cuales pueden ser formadas por el viaje de las ondas en direcciones opuestas en la fuente regional de una tormenta o cerca de la costa. Este mecanismo genera ondas sísmicas con

frecuencias dos veces mayor que las ondas del océano. Hasselman (1963) mostró que ambas teorías cuantitativamente explican observaciones de las ondas oceánicas y sísmicas.

En los estudios de análisis de los niveles de ruido sísmico de fondo asociado a la calidad de redes sísmicas, se comparan las

curvas de Densidad de Potencia Espectral (PSD) con las curvas teóricas de la Figura 3. (Aki y Richard 1980), y el resultado permite hacer una evaluación de las frecuencias predominantes en el espectro del ruido sísmico y de esta forma se puede identificar los probables orígenes de los ruidos en términos de su frecuencia.



**Figura 3.** Densidad de potencia espectral de registros de ruido para una estación típica situada en un asentamiento de roca dura, en un emplazamiento con alto nivel de ruido ambiental (Noisy) y otro emplazamiento con bajo nivel de ruido ambiental (Quiet), (Aki y Richards,1980).

### RELACIÓN SEÑAL / RUIDO

La relación señal/ruido (Signal to noise ratio SNR, ó S/N), se define como el margen que hay entre el nivel de referencia (información significativa) y el ruido de fondo de un determinado sistema. La relación señal/ruido, es la comparación entre la amplitud de la señal sísmica y la

amplitud del ruido causado por el instrumento sísmico u otras causas que no tienen que ver con el sismo. En términos cuantitativos, la energía de la señal para una frecuencia dada, dividida entre la energía remanente (ruido) (Zmeskal y Plesinger, 1995).

Los factores fundamentales que controlan el índice y la calidad de transmisión de la información sísmica son el **ancho de banda (B)** y la **Potencia de la Señal (S)**. El ancho de banda de un canal, es el rango de frecuencias que este puede transmitir con razonable fidelidad; por ejemplo, una estación sísmica de banda ancha tiene un ancho de banda de 0.01 a 50 Hz. La Potencia S de la señal desempeña un papel dual en la transmisión de la información, (S esta relacionado con la calidad de transmisión). Al incrementarse S a la potencia de la señal, se reduce el efecto del ruido de canal y la información se recibe con mayor exactitud, o con menos incertidumbre. Una mayor relación de señal/ruido permite también la transmisión a través de una mayor distancia. En cualquier caso, una cierta relación de señal/ruido mínima es necesaria para la comunicación.

Un criterio para elegir un tipo de filtro adecuado para eliminar el ruido sísmico de fondo, es evaluar previamente la relación señal/ruido. En la practica se ha mostrado que esta relación debe ser mayor a 80 a fin de contar con registros de calidad cuando los sismos tienen magnitudes mayores a 5.8 M. (Tavera y Bufforn 1998).

## **CAUSAS Y NATURALEZA DEL RUIDO**

### **RUIDO CULTURAL**

La fuente más común del ruido sísmico proviene de actividad del hombre sobre la superficie de la Tierra. Esta fuente es referida como “ruido cultural” y se origina principalmente por el registro de la propagación de las ondas sísmicas que es producida por el paso de vehículos, vibración de maquinarias industriales, que se encuentran relativamente cerca de una estación sísmica. El ruido cultural se propaga principalmente como ondas superficiales de alta frecuencia (>1-10 Hz, 1-0.1s) que se atenúan a varios kilómetros de distancia y profundidad. Por esta razón el ruido cultural se reduce significativamente si se evalúan los niveles de ruido sísmico en pozos profundos y túneles. El ruido cultural muestra fuertes variaciones diurnas y tiene frecuencias características que dependen de la fuente del disturbio.

### **VIENTO, AGUA Y RUIDO GEOLÓGICO**

Los objetos se mueven cuando responden a la acción del viento y este movimiento cuando está acoplado a la tierra puede ser fuente importante del ruido sísmico. En general, la turbulencia del viento alrededor de las irregularidades de la topografía y el

acoplador movimiento del árbol a la tierra a través de sus raíces, generarán señales de ruido de alta frecuencia. Además, el viento que actúa en objetos grandes, tales como torres y postes del teléfono puede causar la inclinación de tierra que aparece como ruido de período más largo. Como fuentes adicionales e este tipo de ruido pueden incluirse las corriente de agua, olas y actividad volcánica.

### **MICROSISMOS**

Los microsismos se definen como las oscilaciones naturales y regulares del subsuelo, que no son producidas por los terremotos ni por fuentes artificiales como el tráfico o la maquinaria industrial, si no que son inducidas por fuentes naturales como las olas oceánicas y tormentas, por tanto las características de la amplitud y del periodo son afectadas por la condición del clima. Este tipo de ruido esta compuesto principalmente por ondas Rayleigh de periodo relativamente largo (2-3 mas segundos), y aparece en los registros de todos los sismógrafos, demostrando que la corteza terrestre está en continuo estado de agitación.

### **INFLUENCIA DEL INSTRUMENTO**

Este tipo de ruido se genera por cambios de estabilidad del equipo y diferentes formas dentro del sistema del sismómetro por efectos de la presión barométrica en el sensor (ruido térmico), efectos no lineales

en la fuerza de suspensión sobre la masa ocasionada por el hecho de estar la masa siempre en movimiento (los elementos en suspensión se doblan) o durante el proceso de digitalización (rango dinámico limitado del convertidor análogo/digital).

El instrumento puede presentar ruidos de alta potencia pero de baja probabilidad, y su conocimiento resulta importante y útil para el operador de la red. Por ejemplo, existen espacios vacíos de datos que pueden ser debido a la falta de transmisión de la señal y/o a la mala posición de la masa del sensor (mala calibración).

Para tener una información sísmica de calidad, es necesario remover de todas las señales sísmicas el efecto instrumental, para así recuperar el impulso original emergente del terreno, esto se debe hacer realizando el proceso de la deconvolución ó remoción instrumental.

### **RUIDOS DE PERIODO CORTO**

Estos ruidos presentan altas frecuencias con rangos que se encuentran entre 0.3 a 10 Hz, y en general, son producidos por la respuesta de las condiciones geológicas de las estructuras sobre las cuales se encuentra ubicada la estación sísmica en referencia. Además este tipo de ruido tiene que ver con la actividad diaria del hombre y los cambios bruscos de temperatura durante el día y la noche.

También se debe considerar como ruidos de periodo corto a los producidos por las explosiones en las minas, el paso de camiones en las carreteras, o por la inducción del viento sobre la estación sísmica con rangos de frecuencia mayores a 10 Hz. Este tipo de ruido suele ser importante si en las cercanías de la estación hay vegetación o montañas.

Para evitar al máximo las perturbaciones de periodo corto sobre los sensores, es recomendable acondicionarlos en pozos aislantes sobre roca dura y a una relativa profundidad

### **RUIDOS DE PERIODO LARGO**

Este tipo de ruido se caracteriza por presentar bajas amplitudes y largos periodos (10-300 seg) y se presentan con mayor amplitud en las componentes horizontales del registro. Las causas de origen de este tipo de ruido son:

Los causados por las *fluctuaciones barométricas* en la zona donde se encuentra la estación sísmica, y son producidas por los cambios gravitacionales inducidos por frentes atmosféricos fríos y de calor que perturban directamente a los sismómetros (Muller y Zurn, 1983). La presión del aire varía entre 0.1 mHz y 0.01 Hz, (Beauduin 1996).

Las ondas largas con frecuencias típicas que varían entre 0.001 a 0.05 Hz, juegan

un rol importante en muchos procesos sedimentarios de la costa y en aguas poco profundas, donde se ha demostrado que la energía del espectro de ondas tiene predominio de ondas de periodo largo. Para la banda de frecuencias sobre los 2 mHz, están presentes las eigenfrecuencias de muchas de las oscilaciones libres de la Tierra. Para modos mas graves (0.8 mHz), raramente observados con una buena relación señal/ruido (SNR).

Para reducir este tipo de ruido y facilitar los estudios sobre el contenido de periodos largos en los registros de eventos sísmicos de moderado tamaño, se requiere simultáneamente registrar las variaciones de la presión barométrica cerca del sismómetro y luego sustraer con una función apropiada su interferencia en la señal.

En general, se considera que los ruidos de periodo largo son debidos a la acción de las ondas oceánicas sobre las costas con frecuencias de 0.07 Hz y las ondas oceánicas estacionarias con frecuencias del orden de 0.14 Hz. (ver Figura 3).

### **FILTRADO DEL RUIDO**

Para atenuar el efecto del ruido de fondo presente en los sismogramas y registro sísmico, frecuentemente se utiliza la herramienta del filtrado de la señal a fin de reforzar la calidad de la información que se quiere extraer del sismograma / registro.

Para lograr el filtrado de los registros conviene poner de manifiesto su estructura espectral, lo que se consigue aplicando la integral de Fourier.

Llamando  $f_1(t)$  a la función que representa un sismograma en el dominio del tiempo se tiene para esta función,

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1)$$

y para los mismos en el dominio de las frecuencias,

$$F_1(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(t) e^{-i\omega t} d\omega \quad (2)$$

o sea la Transformada de Fourier  $f_1(t)$

Multiplicando la integral de (1),  $F_1(\omega)$  por la función  $F_2(\omega)$  se convierte la función  $f_1(t)$  en otra.

$$f_{12}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(t) e^{i\omega t} d\omega \quad (3)$$

$$F_{12}(\omega) = F_1(\omega) F_2(\omega) \quad (4)$$

En el contenido espectral  $F_{12}(\omega)$  sobresalen determinadas frecuencias en las que se tiene interés y se atenúan las que sean ruido. Si se desea una apropiada función  $F_2(\omega)$ , la función al ser introducida en (1), se comporta por consiguiente como un filtro y la función

$f_{12}(t)$ , resulta ser lo que queda de la función  $f_1(t)$  después de ser filtrada.

Además de lo precedente y sustituyendo en (4)  $F_1(\omega)$  por su expresión (2) y detallando la (3) se tiene,

$$\begin{aligned} f_{12}(t) &= \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_2(\omega) e^{i\omega t} d\omega \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) e^{i\omega \tau} d\tau \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) d\tau \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_2(\omega) e^{i\omega(t-\tau)} d\omega \end{aligned}$$

Por lo tanto, si  $F_2(\omega)$  es la Transformada de Fourier de una función  $f_2(t)$ :

$$f_{12}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau \quad (5)$$

y por ello también,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_1(\omega) F_2(\omega) e^{i\omega t} d\omega &= \\ \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau &\quad (6) \end{aligned}$$

El resultado de intercambio de roles de  $f_1(t)$  de  $f_2(t)$  se puede escribir también como:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_1(\omega) F_2(\omega) e^{i\omega t} d\omega &= \\ \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_2(\tau) f_1(t-\tau) d\tau &\quad (7) \end{aligned}$$

de lo que también resulta,

$$\int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau =$$

$$\int_{-\alpha}^{+\alpha} f_2(t-\tau) f_1(\tau) d\tau \quad (8)$$

Con análogos procedimientos, pero tratando de hallar la T.F. del producto  $f_1(t) f_2(t)$  se obtiene.

$$\begin{aligned} \int_{-\alpha}^{+\alpha} f_1(t) f_2 e^{-i\omega t} dt &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_1(\omega) F_2(\omega_0 - \omega) d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\alpha}^{+\alpha} F_2(\omega) F_1(\omega_0 - \omega) d\omega \end{aligned}$$

Las expresiones (5), (6), (7) y (8) se dice que son convoluciones de las funciones involucradas y las ecuaciones (6) y (7) el producto de sus componentes espectrales. Análogamente, las igualdades (8) y (4) muestran que multiplicar dos funciones en el dominio del tiempo, equivale a la convolución de sus componentes espectrales en el dominio de las frecuencias.

Entonces, resulta obvio que el filtrado de una función  $f_1(t)$  puede hacerse o bien usando  $F_2(\omega)$  en el dominio de las frecuencias o bien usando la inversa  $f_2(t)$  en el dominio del tiempo.

A los filtros se les clasifica en **filtros pasa bajo, filtros pasa altos y filtros pasa banda**, y como lo expresan sus nombres, los primeros no atenúan las componentes espectrales de frecuencia baja, los segundos no atenúan los de frecuencia alta

y los últimos no atenúan dentro determinados límites de frecuencia.

## VARIACIONES DEL RUIDO DEBIDO A CONDICIONES LOCALES

La variación de los niveles del ruido debido a las condiciones locales es comúnmente conocida como efectos de sitio, y esta directamente relacionada con los ruidos que se producen por el tipo de rocas que componen a las capas del subsuelo, así como de las estructuras geológicas (fallas, volcanes, ríos, montañas, etc), que se encuentran en las cercanías de la estación sísmica ó sobre el cual se encuentra situada una estación sísmica. Cuando la estación se encuentra ubicada sobre subsuelos relativamente jóvenes (materiales blandos poco consolidados) el nivel de ruido dependerá principalmente del espesor de la capa sedimentaria. Por ejemplo: para espesores de 1.5 Km. se tiene frecuencias de 0.04 a 0.09 Hz , para espesores de 290 m. se tiene frecuencias de 0.2 a 0.5 Hz y para espesores delgados de 50 m entre 1.1 a 2.8 Hz. (Bormann et al.,1997). El umbral de frecuencia donde la amplificación del suelo comienza a tener importancia, esta cerca de los 3.5 Hz. y si la frecuencia natural sobrepasa este valor, se puede aplicar el espectro de respuesta desarrollado para un sitio de referencia *en roca*.

Otro tipo de variaciones por efectos

locales son los dados por los cambios de temperatura durante el día y por la noche, así como también por las variaciones climáticas ante la presencia de frentes de frío y de calor que afectan a las presiones barométricas y estas inducen a la masa del sismómetro que produce ruidos de periodo largo.

### **RELACIÓN ESTACIÓN – FUENTE DE RUIDO**

Existe una relación entre la fuente del ruido y la estación sísmica de registro, y esta viene dada por la longitud de onda, que se manifiesta en forma directa sobre los registros de las señales sísmicas, Esta relación depende fundamentalmente de sus valores de frecuencia; es decir, entre mas lejana sea la fuente del ruido esta va a presentar bajos valores de frecuencia (microsismos) y si la fuente, esta relativamente cercana a la estación sísmica, va ha manifestar altos valores de frecuencia (ruido cultural, efectos de sitio y cambios climáticos en la zona de registro).

### **CONCLUSIONES**

Una herramienta útil para analizar el posible origen y el nivel de ruido en una estación sísmica es construyendo curvas de Densidad de Potencia Espectral (PSD) para señales sísmicas transitorias y compararlas con las curvas teóricas proporcionadas por Aki y Richard (1980).

La extensión del presente estudio considera evaluar el nivel de ruido de fondo en todas las estaciones de banda ancha que actualmente integran la Red Sísmica Nacional. (RSN).

El ruido sísmico de fondo se genera principalmente por el ruido cultural (actividad humana) y se propaga principalmente como ondas superficiales de alta frecuencia (>1-10 Hz, 1-0.1s). Otro tipo de ruido son los microsismos ruidos de periodo largo (olas del mar 0.07 Hz y tormentas oceánicas 0.14 Hz), las vibraciones producidas por el viento que generan altas frecuencias (4 a 40 Hz.) y los ruidos producidos por cambios de presión atmosférica generan bajas frecuencias ( 0.1 mHz a 0.01 Hz.).

Para evitar al máximo las perturbaciones de alta frecuencia sobre los sensores y obtener señales sísmicas con bajo nivel de ruido sísmico de fondo, es recomendable acondicionar los sensores en pozos aislantes (túneles, cuevas o cavernas), y ubicarlos a una relativa profundidad y sobre roca dura. Además, se debe instalar la estación sísmica lejos de las principales fuentes generadoras de ruido sísmico de fondo (ciudades, fabricas, carreteras, ríos, lagos, etc), esto es, a distancias mayores 1.5 Km.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi agradecimiento de manera especial al Dr. H. Tavera, Director del CNDG por sus enseñanzas y orientaciones durante mis prácticas. Así mismo mi agradecimiento al personal del CNDG por su orientación y amistad. Finalmente, al Instituto Geofísico del Perú por haberme brindado una beca para realizar mis prácticas pre-profesionales.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Aki, K. y Richards, P. (1980). Quantitative Seismology: Theory and Methods, Vol. I. New York. Pags 273-286

Beauduin, P. Lognonné, P. Montagner.(1996), The Effects of the Atmospheric Pressure Changes on Seismic Signals or How to Improve the Quality of Station. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.86, No. 6, pp. 1760-1769.

Bormann, P., Klinge, K., Wylegalla, K. (1997): Analysis of broadband seismic noise at the German Regional Seismograph Network and search for improved alternative station sites, Journal of Seismology, 1, 357-381.

Kennet, B. (2001). The Seismic Wavefield Volume I: Introduction and Theoretical Development, The Australian National University, Cambridge University Press. Pags. 8-16.

Hasselmann, K. (1963). A statistical análisis of the eration of microseisms, Rev, Geophys., 1, 177-209.

Payo G., (1986), Introducción al Análisis de Sismogramas. Monografías 3 del Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de la Presidencia. Madrid, España.

Plesinger, A., M.Zmeskal, J.Zednik, 1995: PREPROC - Program for automated preprocessing of digital seismic data. GI ASCR Prague, N.E.I.C. U.S.G.S. Golden, pp.130.

Tavera, H. y E. Buforn. (1998). Sismicidad y Sismotectónica de Perú. Física de la Tierra 10, 187-219

Wiechert, E. (1904). Ein astatisches Pendel höher Empfindlichkeit zur mechanischen Registrierung von Erdbeben, Beitr. Geophys 6, 435-450.

## NIVELES DE RUIDO EN ESTACIONES DE BANDA ANCHA DE LA RED SÍSMICA NACIONAL - PERÚ

Elard Cutipa & Hernando Tavera

Centro Nacional de Datos Geofísicos-Sismología  
Instituto Geofísico del Perú  
elardcutipa99@yahoo.es  
jtavera@axil.igp.gob.pe

### INTRODUCCIÓN

La actual Red Sísmica Nacional Perú (RSN) tiene por objetivo monitorear la ocurrencia de sismos en el territorio y para tal fin, esta compuesta por estaciones sísmicas de período corto y banda ancha. Estas últimas fueron instaladas a partir del año 1996 y a la fecha se cuenta con 15 estaciones. Con dicha red, se provee de información uniforme y de buena calidad para la localización rápida de los sismos sensibles y para los estudios detallados de las áreas potencialmente sísmicas. En general, el procedimiento seguido para la instalación de estaciones sísmicas considera como punto de partida que el sensor se encuentre en suelo rocoso para reducir los niveles de ruido natural, lo cual casi siempre es imposible de lograrse en razón de que es necesario considerar otros factores como seguridad y acceso rápido a la estación sísmica. No todas las estaciones de banda ancha de la RSN fueron instaladas en roca; por lo tanto, se hace necesario conocer los niveles de ruido existente en cada emplazamiento a fin de poder cuantificar la calidad de señal que se registra. Estudios similares han sido hechos para las redes sísmicas mundiales como la USGS (Peterson, 1993), GEOSCOPE (Stutzmann et al, 2000), nacionales como la de Alemania (Bormann et al, 1997) y España (Chavarría et al, 2001) y en general, asocian la presencia del ruido a las tormentas, oscilaciones del mar, la presión barométrica y las que se producen cerca de la zona en donde funciona la estación sísmica.

En este estudio, se analiza el nivel de ruido existente en los actuales emplazamientos de las 15 estaciones de banda ancha que integran la RSN (Figura 1) a fin de cuantificar la calidad de la señal que se registra en cada estación dentro del rango de 0.1 y 100 segundos. Las curvas de densidad de potencia espectral presentadas en este estudio consideran una relación señal-ruido y la señal utilizada para cada estación corresponde a períodos tomados para el día, la noche y para las diferentes estaciones del año. Las estaciones de banda ancha de la RSN están compuestas por sensores GURALP 40T con un ancho de banda de 0.33 Hz – 50 Hz. y Streckeisen STS-2 con un ancho de banda de 8.33 mHz – 50 Hz., con registradores Reftek a 24 bits y frecuencia de muestreo de 20 s.p.s. todas con tres componentes de registro.



Fig. 1. Mapa de ubicación de las estaciones sísmicas de banda ancha que integran la Red Sísmica Nacional del Perú.

## METODOLOGÍA UTILIZADA

A fin de conocer las características de los niveles de ruido existente en las estaciones de banda ancha de la RSN, se elaboró una subrutina en lenguaje Matlab para construir las curvas de densidad de potencia espectral, PSD (Aki y Richards, 1980). Esta subrutina elabora los PSD con ventanas de señal de 1 hora tomados para diferentes días, horas y años, esto para cada estación. Las curvas de densidad de potencia espectral obtenidas fueron correlacionadas con las curvas de niveles de ruido máximo y mínimo propuesto por Peterson (1993) para las estaciones de la red sísmica mundial (USGS). Inicialmente, cada ventana de señal ha sido corregida por su respuesta instrumental a fin de tener la señal en unidades metros/segundo y al construir las curvas de densidad espectral (PSD), en unidades de decibeles con respecto a la aceleración  $(m/s^2)^2 / Hz$ . Inicialmente, este procedimiento de análisis ha sido aplicado a las estaciones de Pucallpa (PUC) ubicada en la zona subandina de la región central y La Yarada (LYA) en la zona de costera de la región sur de Perú.

## RESULTADOS

En la Figura 2, se presenta los resultados obtenidos para las estaciones de PUC y LYA para el día 2 de enero de 2001 a horas 00 y 12 horas, componente vertical. En dicha figura (00 horas) se observa que para periodos mayores a 10 segundos, en la estación LYA se produce una mayor amplificación del nivel de ruido y esto puede ser debido a que el sensor de la estación, ubicado sobre roca fragmentada, parcialmente es afectado por la oscilación del mar. Para periodos menores a 1 segundo, las amplitudes del ruido son mayores en la estación PUC, esto debido a que el sensor de la estación, ubicado sobre

suelo compuesto por sedimentos, amplifica la señal por efectos locales. En la misma figura y para las 12 horas, se observa que el ruido para períodos mayores a 10 segundos presenta características similares que el ruido observado para las 00 horas y por el contrario, el ruido se amplifica en ambas estaciones por debajo de 1 segundo y mucho más en la estación PUC, especialmente en una ventada de 0.3 a 0.4 segundos. La estación PUC además de estar ubicada sobre suelo sedimentario, también esta cerca de una carretera donde el tránsito vehicular es moderado, lo cual podría estar afectando a la señal dentro de este rango de períodos.

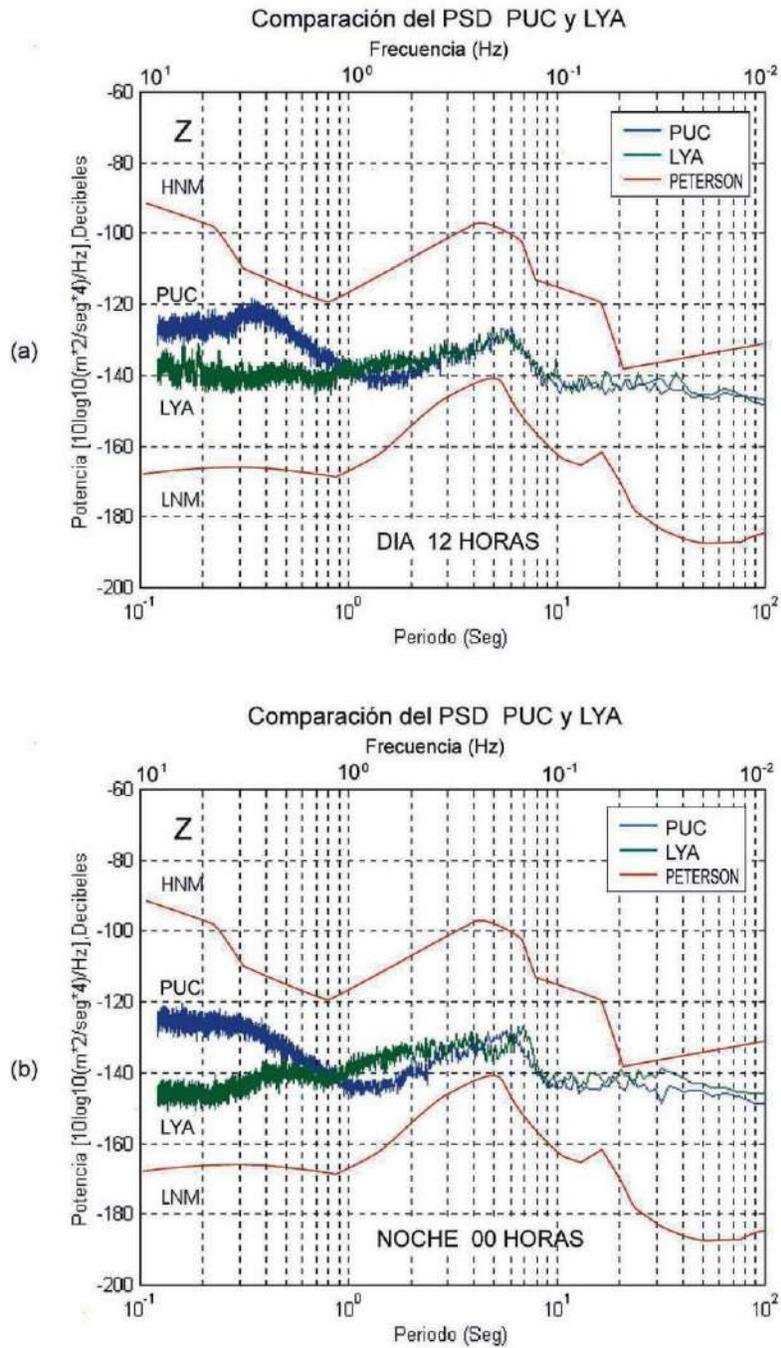
Este procedimiento viene siendo aplicado al resto de las estaciones sísmicas que integran la RSN y sus resultados permitirán conocer cual de las estaciones proporciona información de mejor calidad y cuales son necesarias reubicarse por presentar altos niveles de ruido o en todo caso, mejorar su logística para reducir el ruido.

### **CONCLUSIONES PRELIMINARES**

Se ha puesto a punto el procedimiento a seguir para el análisis del nivel de ruido sísmico existente en las estaciones de banda ancha de la RSN utilizando curvas de densidad de potencia espectral. Inicialmente se ha analizado el nivel de ruido presente en las estaciones PUC y LYA. En general, los resultados sugieren que en la estación de LYA, por estar cerca de la línea de costa de la región sur de Perú, es afectada con ruidos de periodos largos generados posiblemente por la oscilación del mar. Para periodos menores a 1 segundo, el ruido se amplifica mas en la estación de PUC principalmente durante el día, lo cual puede ser debido a que el suelo es sedimentario y esta cerca de una carretera de transito vehicular moderado. De acuerdo a las curvas de Peterson (1993), los niveles de ruido son menores entre periodos de 1 a 10 segundos, siendo esta ventana en la cual se registran el mayor numero de sismos con magnitudes mayores 4.0ML ocurridos en Perú.

### **REFERENCIAS**

- Aki, K. & Richards, P. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, Vol. I. New York. Pags 273-28
- Bormann, P., Klinge, K. & Wylegalla, K.(1997): Analysis of broadband seismic noise at the German Regional Seismograph Network and search for improved alternative station sites, *Journal of Seismology*, 1, 357-381.
- Chavarría, L. Susagna, T. (1998), Caracterización del ruido sísmico en emplazamientos de la red sísmica de Catalunya con sensor de banda ancha, (PDF-190KB).1ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almería, 9-13 de febrero de 1998
- Peterson, J. (1993). Observation and modeling of seismic background noise. *U.S. Geol. Surv. Tech. Rept.*, 93-322, 1-95.
- Stutzmann, E, G. Rault, & Astiz L.,(2000), Geoscope Station Noise Levels. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 3, pp. 690–701.



**Fig. 2.** Densidad de potencia espectral para el ruido sísmico existente en las estaciones de PUC y LYA: (a) registros obtenidos de día (12 horas) y (b) registros obtenidos de noche (00 horas) durante el mes de enero de 2001. Comparados a los niveles de referencia HNM (alto nivel de ruido) y LNM (bajo nivel de ruido) de Peterson 1993.

**ANALISIS DE LOS NIVELES DE RUIDO EN LAS ESTACIONES DE BANDA  
ANCHA DE LA RED SISMICA NACIONAL – PERU**

Elard Cutipa y Hernando Tavera  
Dirección de Sismología – CNDG  
Instituto Geofísico del Perú  
[htavera@geo.igp.gob.pe](mailto:htavera@geo.igp.gob.pe)

Enviado al Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 4 de octubre 2006

## RESUMEN

El nivel de ruido presente en las estaciones sísmicas de banda ancha de la Red Sísmica Nacional (RSN) a cargo del Instituto Geofísico del Perú (IGP) ha sido estudiado para cuantificar la calidad de la señal sísmica que se registra en el rango de frecuencias de 0.01 a 10 Hz. Para tal fin, se aplica el método de Densidad de Potencia Espectral (PSD) y se utiliza ventanas traslapadas de frecuencias de 7.425 minutos de longitud de registro. Los resultados muestran que el rango de frecuencias de 1 a 10 Hz, las estaciones sísmicas de CUS, YLA y CHA por encontrarse en roca, alejadas de fuentes naturales o artificiales presentan un bajo nivel de ruido sísmico. Contrariamente, las estaciones CTH, PUC y CAJ al estar operando sobre material aluvial y tufo volcánico, y cercanas a fuentes de ruido cultural (actividad del hombre, carreteras, ciudades, etc.), presentan altos niveles de ruido. Para frecuencias intermedias (0.1 a 1 Hz.), los niveles de ruido se encuentran próximos al mínimo establecido por Peterson(1993); mientras que para las bajas frecuencias (menores a 0.1 Hz.) se observan fuertes incrementos en el nivel de ruido debido a las fluctuaciones locales de la presión atmosférica.

## INTRODUCCION

La Red Sísmica Nacional (RSN) a cargo del Instituto Geofísico del Perú, tiene por objetivo monitorear la ocurrencia de sismos en el territorio peruano y para tal fin, esta integrada por 31 estaciones sísmicas entre periodo corto y banda ancha. Estas últimas fueron instaladas a partir del año 1993 y a la fecha se cuenta con 13 estaciones. Con dicha red, se provee de información adecuada para localización rápida de los sismos sensibles y para los estudios detallados de áreas potencialmente sísmicas. Sin embargo, la calidad de la información no solo depende del instrumental, sino que es necesario considerar las características geológicas y físicas del área en donde se encuentra la estación sísmica. En estas condiciones, se debe asumir que el procedimiento seguido para la instalación de una estación sísmica considera como punto de partida que el sensor se encuentre en suelo rocoso y así, reducir los niveles de ruido, lo cual casi siempre nos es imposible de lograrse en razón de que es necesario considerar otros factores como seguridad, transmisión de data y acceso rápido. En razón a esto, no todas las estaciones de banda ancha de la RSN fueron instaladas en roca ni en las mejores condiciones de logística; por lo tanto, es necesario conocer los niveles de ruido existente en cada emplazamiento y así poder cuantificar la calidad de la señal que se registra.

A nivel mundial, se han realizado diversos estudios sobre el ruido presente en las estaciones sísmicas en razón que la calidad de los datos se ve grandemente afectada si el ruido, cualquiera sea su origen, se incrementa. Estos estudios han sido realizados para redes sísmicas mundiales como la U.S. Geological Survey – USGS (Peterson, 1993), GEOSCOPE (Stutzmann et al, 2000) y nacionales como la del Eastern Kazakhstan (Berger y Eissler, 1998), Alemania (Borman et al, 1997), España (Chavarria et al, 2001) y para el Suroeste de Estados Unidos (Wilson et al, 2001), aplicándose en todos casos el método de Densidad de Potencia Espectral. De estos estudios, el realizado por Peterson (1993) puede ser considerado como el más completo en razón que el autor considera información de aproximadamente 780 estaciones que integran la red sísmica mundial y que incluyen estaciones de periodo corto, banda ancha y de muy ancha banda. En general, estas estaciones tienen sus sensores instalados en diversidad de condiciones geológicas (tipos de suelo y roca) y logísticas dependiendo del lugar en donde operan (superficie o en túneles), y la información utilizada ha permitido al autor considerar rangos de nivel de ruido máximo y mínimo a tomarse en cuenta para futuros emplazamientos sísmicos (Figura 1). Por

ejemplo, las estaciones con niveles mínimos de ruido (NMLN) se encuentran sobre roca dura en el interior de pozos hasta 100 metros de profundidad; por lo tanto, alejadas de posibles fuentes de ruido y en las cuales la calidad de la señal sería óptima. Las estaciones con altos niveles de ruido (NMHN) se encuentran dentro de las ciudades, cercanas a la costa, en islas, en suelos aluviales y próximos a la superficie del terreno; por lo tanto, la calidad de la señal sísmica decrece y se requiere de la aplicación de filtros.

En general, los autores antes indicados consideran que el ruido existente en los registros sísmicos puede ser de origen artificial o natural y llegan a proponer una clasificación en función de los rangos de frecuencia predominante y la fuente que los origina. En la Tabla 1 se muestra en detalle la clasificación propuesta y en ella se observa que el origen del ruido puede ser asociado al tráfico de vehículos, al viento, al hombre, a la resonancia del suelo, actividad minera, a la impedancia acústica, a las olas del mar, a las tormentas oceánicas y a las presiones atmosféricas dentro de un rango de frecuencias que va desde  $10^{-5}$  a  $10^2$  Hz (Zorrealis, 1971; Beauvain et al, 1996).

En este estudio, se analiza y evalúa los niveles de ruido presente en nueve estaciones sísmicas de banda ancha que integran la Red Sísmica Nacional (RSN) hasta el año 2005. Para tal fin se aplica el método del PSD y los resultados obtenidos son comparados con el modelo propuesto por Peterson (1993) y clasificados según el rango de frecuencias establecidas en la Tabla 1. A tenor de la variedad de las frecuencias observadas, se discriminaron los diferentes tipos de ruido que afectan a las estaciones y que perturban los registros sísmicos obtenidos de la RSN.

## **LA RED SISMICA NACIONAL (RSN)**

La RSN del Perú está integrada por 31 estaciones sísmicas, de las cuales 18 son de periodo corto y 13 de banda ancha (Figura 2), estas últimas fueron instaladas a partir del mes de noviembre de 1996, fecha en que se inicia su implementación. Las estaciones sísmicas de banda ancha están integradas por sensores de tres componentes de tipo Guralp 40T, con anchos de banda de 0.033 a 50 Hz. y registradores Reftek con resolución de 24 bits, y control de tiempo GPS. La señal proveniente de estas estaciones es almacenada en sus respectivas unidades de

campo y otras transferidas a la sede central mediante interrogación por línea telefónica para la pronta localización de los sismos.

El principal objetivo del IGP para la implementación de I RSN, fue ampliar la cobertura azimutal de la red sísmica a fin de lograr mayor conocimiento sobre las características de las principales fuentes sismogénicas existentes en el país (Tavera et al, 2001). Por lo tanto, no todas las estaciones fueron instaladas en condiciones logísticas favorables (en roca, en el interior de túneles) en razón que era necesario cumplir con otros requisitos básicos como son la seguridad de la estación, el acceso a la misma y transmisión de la data sísmica. En estas condiciones, se hace necesario evaluar las características de la señal que se registra en cada emplazamiento a fin de conocer el tipo de ruido que pudiera interferir en la calidad de la información sísmica. En la Figura 2 y tabla 2 se presenta la ubicación y características principales de operatividad de cada una de las estaciones sísmicas de banda ancha que fueron consideradas en este estudio.

## **DATOS Y METODOLOGIA**

Para el análisis y evaluación de los niveles de ruido existente en los registros sísmicos de nueve estaciones de banda ancha de la RSN, se ha extraído de manera aleatoria de la base de Datos del Centro nacional de datos Geofísicos (CNDG) del IGP, muestras de ruido con longitudes de registro una hora para las 6.00 a.m., 12:00 día y 12:00 noche (hora local) de cualquier día del mes del año. Para su procesamiento la data seleccionada fue corregida por su respuesta instrumental y convertida a formato ASCII. Con la ayuda del programa "RUIDOIGP" desarrollado en Matlab 6.5 y siguiendo la metodología establecida por Peterson (1993). La señal en unidades de velocidad fue derivada para convertir en aceleración y luego expresarla en unidades de decibeles con respecto a la aceleración  $((m^2/s^2)/Hz)$ . A continuación se seleccionaron 12 ventanas de tiempo de señal con duraciones de 7.425 minutos (8910 muestras) y luego para su análisis fueron traslapadas en 75% a fin de disponer de ventanas de muestreo que permitan una mejor evaluación de ruido. El posible truncamiento de la señal en los extremos de cada ventana fue corregido utilizando una ventana de Hanning al 2%. Finalmente, las curvas de PSD han sido calculadas para cada una de las ventanas de señal y luego comparadas con el modelo propuesto por Peterson (1993). La interpretación de los resultados considera el análisis del ruido sísmico en función de sus frecuencias predominantes durante el día, la noche y en cada estación del año.

## APLICACIÓN Y RESULTADOS

La metodología antes discutida ha sido integrada en el programa RUIDOIGP y aplicada a nueve estaciones de banda ancha de la RSN a fin de evaluar los niveles de ruido presente en cada una de ellas. En general, el análisis considera muestras de señal de cada estación para las 6:00 a.m., 12:00 del día y 6:00 p.m. de cualquier día del año y mes del año. Para el análisis de ruido es necesario tener en cuenta la geología (tipo de suelo o roca), la logística seguida para la instalación (acceso, transmisión de la data, ubicación del sensor en superficie ó túneles, etc.) y las variaciones del clima (lluvia, incremento ó descenso de la temperatura, presión atmosférica, etc.) presentes en el área en donde se encuentra la estación sísmica y que en el caso de la RSN, todas ellas fueron resumidas en la Tabla 2. El análisis de los resultados obtenidos en este estudio se realiza en base de tres rangos de frecuencias comprendidas entre 0.01 a 10 Hz, siendo este limite impuesto por el ancho de registro y muestreo establecido para las estaciones de banda ancha de la RSN.

En la figura 1 se muestra los rangos antes indicados, así como las principales fuentes que originarían el ruido que en ellos prevalece.

Las curvas de PSD para las nueve estaciones de banda ancha analizadas en este estudio se presentan en el Anexo y en ellas se observa, de acuerdo al esquema propuesto por Peterson (1993), que los niveles de ruido identificados para la RSN se encuentran en promedio sobre los 140 dB; es decir, en la media del rango establecido para la red sísmica mundial. En general, las amplitudes del nivel de ruido presente en todas las estaciones son similares, aunque es posible identificar la presencia de anomalías en aptitud de hasta 25 dB y cuyo origen estaría asociado, en la mayoría de los casos, al ruido cultural (personas, trafico vehicular, cercanía de ciudades, etc), geológico (suelos aluviales o rocosos) y a las variaciones de la presión atmosférica.

De acuerdo a las figuras presentadas en el Anexo, dentro del rango de frecuencias de 1 a 10HZ los niveles de ruido soportan ligeros incrementos para las componentes verticales y mayor en las componentes horizontales de la estaciones de PUC, LYAR, YLA, CHA Y TOQ, hasta el orden de 15 dB como es el caso de la estación CTH y CAJ, lo cual implica que estas estaciones presentan los mayores niveles de ruido dentro del rango de frecuencias establecidas. Los bajos niveles de ruido han sido observados en las estaciones de HUA y CUS, en esta última porque se encuentra ubicado y a 20 metros en el interior de un túnel. En relación a las

variaciones del ruido durante las estaciones del año, se observan fluctuaciones en la estación LYA e incrementos marcados en el caso de CAJ o descensos en las frecuencias de 2 a 3 Hz en la estación de CAJ o descensos en las frecuencias de 2 a 3 Hz en la estación CHA durante el cambio estacional de primavera a invierno. Los niveles de ruido presentes en este rango de frecuencias tienen su origen en el ruido cultural producido por la cercanía de las estaciones a carreteras, árboles y ciudades (HUA, CAJ, CTH, LYAR y PUC) por encontrarse sobre suelos fluviales (CTH y PUC) ó por su cercanía a centros mineros (TOQ y CAJ).

Para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz, el ruido sísmico en todas las estaciones tienden a los niveles mínimos según el modelo propuesto por Peterson(1993), siendo las estaciones de CAJ y CUS las mas representativas, esto es debido a que ambas se encuentran instaladas en roca y en el interior de túneles, el primero a 20 metros y el segundo a 10 metros. En algunas estaciones como HUA, CHA y CTH se observa la presencia de ligeros incrementos con picos en las frecuencias de 0.5 a 0.7 Hz y cuyo origen es difícil de poder definirse. De manera estacional, se observa ligeros incrementos de hasta 8 dB durante el verano e invierno en las estaciones de CTH, HUA y CAJ, en esta ultima, para frecuencias de 0.5 a 0.7 Hz y cuyo origen es esta última, para frecuencias un poco mayores a 0.9 Hz que podrían tener su origen en las labores mineras que se desarrollan cerca de la estación. En general en este rango de frecuencias se espera perturbaciones producidas por la influencia del mar (oleaje y tormentas oceánicas), y de todas las estaciones las únicas que podrían ser afectadas por su cercanía a la línea de costa son las estaciones de CAJ, YLA, TOQ y LYA, esta ultima en mayor porcentaje por encontrarse a escasos 6 Km de distancia de la costa (Figura 2).

En el rango de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz, casi el total de las estaciones presentan altos niveles de ruido y en algunos casos se incrementan en las componentes horizontales por encima de los rangos establecidos por Peterson (1993), tal es el caso de las estaciones de CTH, LYAR. Para las otras estaciones las amplitudes del ruido están cercanas a los límites máximos, únicamente la estación de CUS presenta niveles mínimos de ruido, aunque su amplitud se encuentra en la parte media del modelo establecido por Peterson (1993). Estos rangos de frecuencias son atribuidos a efectos atmosféricos y mas directamente a las variaciones de la presión, siendo mayor en las estaciones que se encuentran próximas a la superficie como CTH y LYAR, y menores en la estación del CUS al estar ubicado en el interior de un túnel.

Desde el punto de vista geográfico; es decir, ubicación de las estaciones con respecto a las posibles fuentes de ruido, se debe indicar que la presencia de ruido en las estaciones de LYA y TOQ se debería básicamente a su cercanía a la costa que amortigua el movimiento del mar y de sus olas. En el caso de las estaciones de PUC, CTH y CAJ el ruido que prevalece en sus registros es de tipo cultural (1 a 10 Hz) debido a sus cercanías a las ciudades y por el tipo de suelo sobre el cual se encuentran instalados los sensores (suelos fluvio-aluviales). Las estaciones que se encuentran ubicadas sobre roca y alejadas del ruido cultural son LYA, YLA y CHA; sin embargo, los ligeros incrementos en los niveles de ruido se deberían básicamente a la presencia de vientos y lluvia (1 a 10Hz). De todas las estaciones, las de CUS y CAJ por encontrarse sobre roca y en el interior de túneles presentan bajos niveles de ruido para el rango de frecuencias de 0.1 a 1 Hz, lo cual es observable cuando se hace uso de sus registros en el estudio de los sismos.

## **DISCUSION Y CONCLUSIONES**

El estudio de los niveles de ruido sísmico en nueve estaciones de banda ancha pertenecientes a la RSN del Perú ha permitido cuantificar la calidad de los registros que se viene obteniendo de cada una de ellas. Se ha comprobado que el método de Densidad de Potencia espectral es una herramienta útil para el desarrollo de este tipo de análisis. En general, el rango de análisis de la señal sísmica se encuentra entre 0.01 a 10 Hz, en razón que la información que se dispone es de gran utilidad para los estudios sismológicos en el campo cercano y lejano; es decir, efectos de sitio, procesos de ruptura y oscilaciones propias de la Tierra.

Para una mejor evaluación de los resultados obtenidos en este estudio, se ha visto por conveniente agrupar en la Figura 3 los PSD correspondientes a las horas en las cuales se ha observado los mayores niveles de ruido en cada estación y por lo general, corresponden a las 12:00 horas del día. De acuerdo a esta figura, en la banda de frecuencias de 1 a 10 Hz se observa que las amplitudes del ruido varía en 25 dB entre las estaciones de CUS, LYA y CHA ubicadas en roca y en el interior de túneles (CUS) con respecto a las de CTH y PUC ubicadas sobre suelo aluvial y en superficie. Este tipo de ruido tiene relación directa con el producido culturalmente (personas, tráfico de vehículos, cercanía a ciudades, etc.).

De acuerdo a esta figura, para el rango de frecuencias entre 0.1 a 1 Hz, se observa que todas las estaciones presentan niveles de ruido cercanos al mínimo establecido por Peterson (1993), aunque es notoria la presencia de algunas

perturbaciones del orden de 8 dB en relación al menor valor observado en la estación CUS. En general, dentro de este rango de frecuencias los ruidos podrían tener su origen en el tipo de suelo sobre el cual opera el sensor (CTH, PUC) o por sus cercanías a la costa (TOQ, YLA, CAJ). En la banda de frecuencias de 0.01 a 0.1 Hz todas las estaciones presentan altos valores de amplitud, casi cercanas al nivel máximo propuesto por Peterson (1993) y variando entre ellas en un rango de 9 dB. Aquí, las diferencias son claras entre la estación de CUS que al estar en el interior de un túnel, presenta los menores valores y la estación CTH, sobre la superficie los altos valores. En general,. Para este rango de frecuencias el ruido esta asociado a fluctuaciones de la presión atmosférica que hace la Tierra se comporte como una masa elástica que genera perturbaciones de muy bajas frecuencias.

El análisis y evaluación del nivel de ruido que se registra en cada una de las nueve estaciones sísmicas de banda ancha consideradas en este estudio, han permitido reconocer, de acuerdo al rango de frecuencias de interés, que su calidad dependerá básicamente si la estación se encuentra en roca y en el interior de túneles. En estas condiciones los niveles de ruido decrecen considerablemente en relación a la obtenida para estaciones que operan cerca de la superficie y en suelo aluvial. El conocimiento obtenido sobre los niveles de ruido presentes en las estaciones de banda ancha facilitara la explotación de la data sísmica a utilizarse en los diversos estudios de investigación en razón que se podría escoger adecuadamente un determinado tipo de filtro a aplicarse en base a la relación señal/ ruido.

A pesar que resulta difícil poder cumplir con todos los requisitos y seguir el procedimiento adecuado para la instalación de una estación sísmica, es importante realizar la evaluación de sus niveles de ruido a fin de proceder a asignar un determinado valor de calida a la señal que se registra.

## BIBLIOGRAFÍA

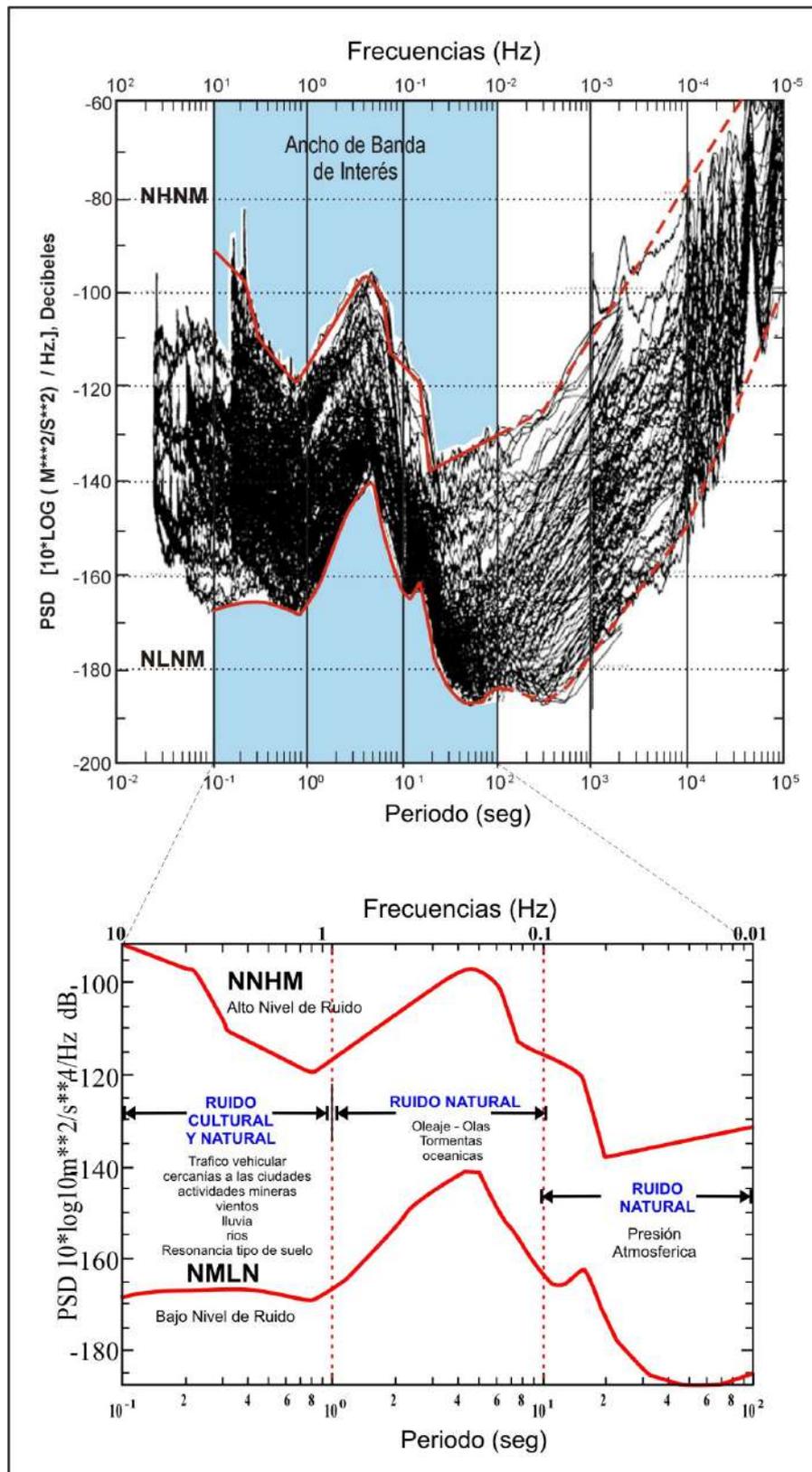
- Beauduin, P., P. Lognonne, J. Montagner, S. Cacho, J. Karczewski, and M. Morand (1996). The effects of atmospheric pressure changes on seismic signals, or how to improve the quality of a station, *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, 1760–1799.
- Berger J. y Eissler H. K., (1988). Studies of high-frequency seismic Noise in Eastern Kazakhstan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, No. 5, pp. 1744–1758.
- Bormann, P., Klinge, K., Wylegalla, K.(1997). Analysis of broadband seismic noise at the German Regional Seismograph Network and search for improved alternative station sites, *Journal of Seismology*, 1, 357-381.
- Chavarria, L. Susagna, T. (1998), Caracterización del ruido sísmico en emplazamientos de la red sísmica de Catalunya con sensor de banda ancha, (PDF-190KB). 1ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almería, 9-13 de febrero de 1998
- Peterson, J. (1993). Observation and modelling of seismic background noise. U.S. Geol. Surv. Tech. Report., 93-322, 1-95.
- Stutzmann, E, G. Roult, y Astiz L.,(2000), Geoscope Station Noise Levels. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 3, pp. 690–701.
- Sorrells, G. G., (1971). A preliminary investigation into the relationship between long-period seismic noise and local fluctuations in the atmospheric pressure field, *Geophys. J.R. Astr. Soc.* 26, 71-82.
- Tavera H. y Buforn (2001). Source mechanism of earthquake in Perú. *Journal of Seismology*, V5, N.4, 519-540.
- Wilson D., Joseph Leon, (2002). Broadband Seismic Background Noise at Temporary Seismic Stations Observed on a Regional Scale in the Southwestern United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 8, pp. 3335–3341.

**Tabla 1:** Características de emplazamientos de las estaciones sísmicas de banda ancha utilizadas en este estudio

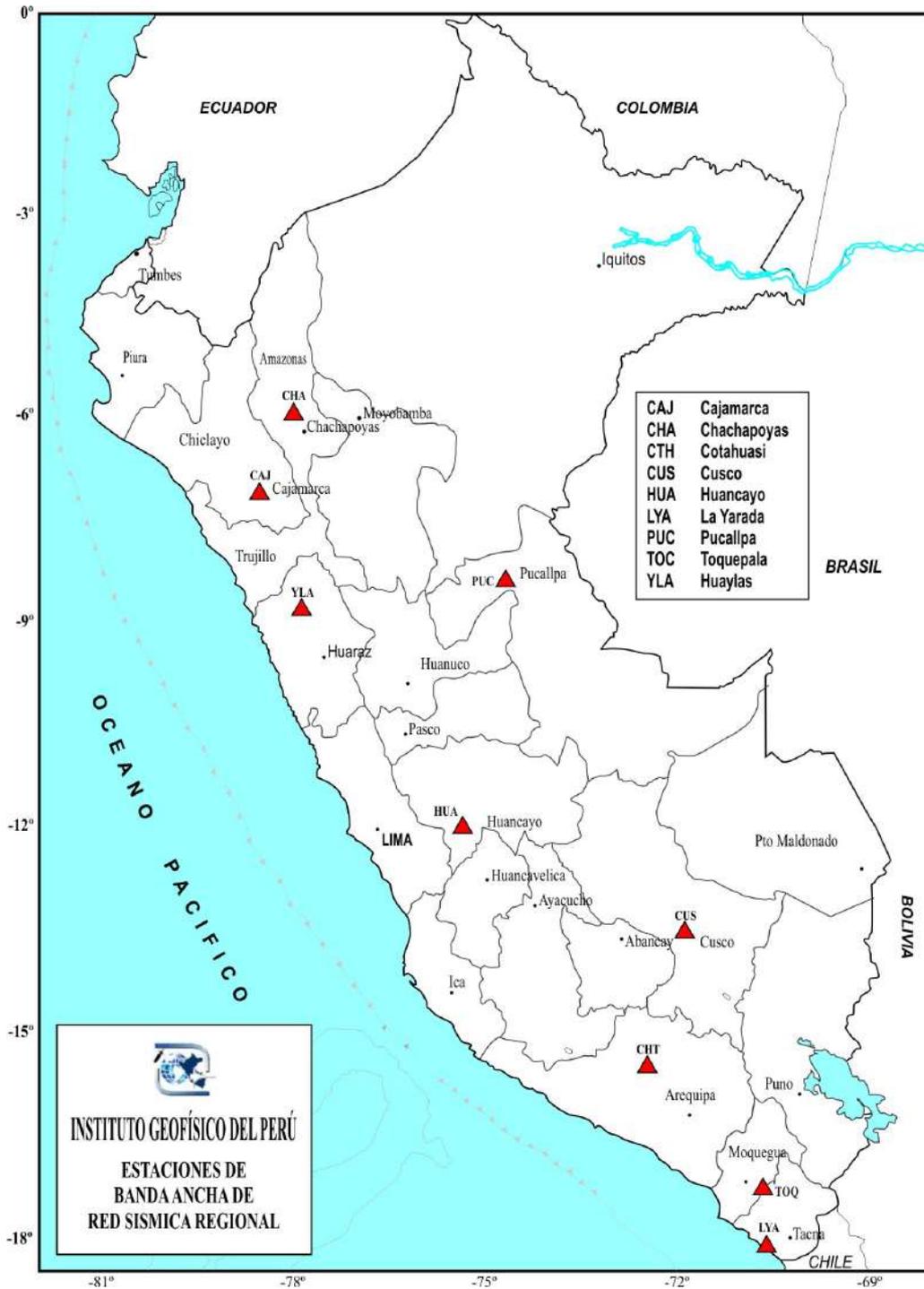
ESTACION	CODIGO NACIONAL	LATITUD S°	LONGITUD N°	ELEVACION msnm	GEOLOGIA	CONDICIONES DE INSTALACION	CLIMA
Cajamarca	CAJ	-07.130	-78.516	2750	Roas volcánicas Andesíticas y traquíticas de dureza baja a media.	Tunel (10m)	Valle de Sierra
Cotahuasi	CHT	-5.21	-72.89	2707	depósitos aluviales de arcillas, conglomerados y gravas. cuaternario reciente	Pilar Concreto	Valle de Sierra
Cusco	CUS	-13.478	-71.979	3558	Roas sedimentarias lutitas areniscas rojizas y conglomerados compactados del paleozoico	Tunel (20m)	Cordillera de Sierra
Chachapoyas	CHA	-06.269	-77.856	3041	Roas clásticas consisten de areniscas lodolitas y conglomerados del Paleozoico	Pilar Concreto	Selva Alta
Huancayo	HUA	-12.038	-75.322	3330	Depósitos glaciales de morrenas y terrazas de conglomerados del Cuaternario.	Pilar Concreto	Valle de Sierra
Huaylas	YLA	-8.847	-77.889	3230	Cuarcitas areniscas y arcillitas, con mantos de carbón	Pilar Concreto	Valle de Sierra
Pucallpa	PUC	-08.397	-74.668	130	Depósitos fluvio-aluvial capas de arcillas margenes, del Terciario.	Pilar Concreto	Tropical Selva Baja
Toquepala	TOQ	-17.307	-70.643	2586	Roas volc. composición andesítica, dacítica y riodacítica del Cretáceo.	Pilar Concreto	Valle de Sierra
La Yarada	LYA	-18.135	-70.568	348	Roas volcansedimentaria de derrames y piroclastos andesíticos del Mioceno.	Pilar Concreto	Desértico Costa

**Tabla 2:** *Tipos de ruidos y frecuencias predominantes según los resultados obtenidos por Peterson (1993), Beauduin et al (1996), Bormann et al, (1997) y Stutzmann et al, (2000)*

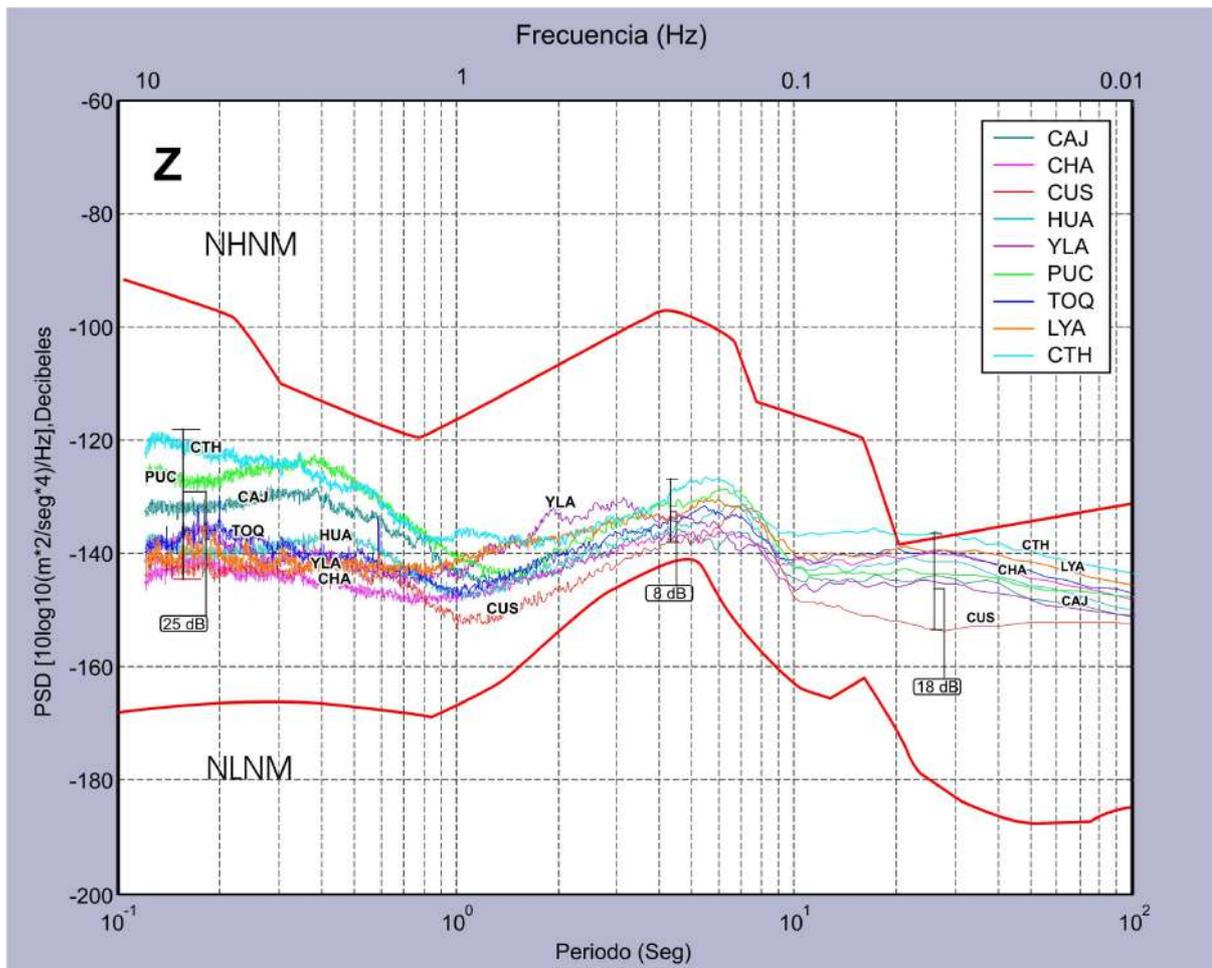
TIPOS DE RUIDOS	CARACTERISTICAS	FRECUENCIAS (Hz)
Ruidos Producidos por el tráfico de Vehículos	Dependen de la distancia de la Estación a la Carretera	Las frecuencias oscilan con valores mayores a 5 Hz. ( $f > 5$ Hz.)
Ruidos Producidos por el viento J. Berger.	Ruidos producidos por el impacto del viento en árboles cerca de la estación.	Las frecuencias oscilan con valores mayores a 4 Hz. ( $f > 4$ Hz.)
Ruidos producidas por el Hombre	Esta relacionado a la actividad diaria del hombre generalmente se presentan en estaciones cerca de los poblados.	Las frecuencias varían de 1 a $f > 2$ Hz. Dependiendo de la distancia de la ciudad a la estación.
Ruido Producido por resonancia de frecuencias por el tipo de suelo.	Cuando la estación se encuentra ubicado sobre un suelo suelto (depósitos cuaternarios – Terciarios), estas dependen del espesor de la capa sedimentaria.	Por ejemplo: 0.04 a 0.09 Hz para 1.5 Km. 0.2 a 0.5 Hz para 290 m. 1.1 a 2.8 Hz para 50 m.
Ruidos Producidos por la actividad Minera.	Dependen de la distancia de la Estación sísmica a la Mina.	Las frecuencias varían $f > 0.5$ Hz.
Ruidos hechos por el Hombre.	En estaciones de Roca dura	Las frecuencias $f > 1$ Hz
Impedancia Acústica.	Ruido producido por contraste de impedancia acústica entre limonitas triásicas y depósitos del cuaternario	Las frecuencias son $f > 1$ Hz.
Olas del Mar	Ruidos producidos por el choque de las Olas de Mar con el litoral de la costa. Las Variaciones son por la proximidad de la Estación al Mar.	Las frecuencias oscilan entre $0.06 \text{ Hz} < f < 0.3 \text{ Hz}$ .
Tormentas oceánicas.	Microsismos naturales ocurridos en el fondo del mar producido por las ondas sísmicas estacionarias causadas por el oleaje.	Las frecuencias Están entre 0.3 y 0.5 Hz.
Ruido Atmosférico	Ruidos producidos por efectos las fluctuaciones de la presión Atmosférica.	Las frecuencias Se encuentran entre 0.001 a 0.03 Hz.



**Figura 1.-** Distribución de las curvas de PSD obtenidos por Peterson (1993) para las estaciones de la red sísmica mundial. Los códigos NMHN y NMLN representan el máximo y mínimo nivel de ruido sísmico establecido para el emplazamiento de una estación sísmica. En la parte inferior se indica el rango de frecuencias en la cual operan las estaciones de banda ancha de la RSN y las principales fuentes de origen para el ruido.



**Figura 2.-** Distribución espacial de las estaciones de banda ancha que integraban la RSN del Perú hasta el año 2005y que fueron utilizadas en este estudio. Las características de dichas estaciones, se presentan en la Tabla 2.



**Figura 3.** Comparación de las curvas de PSD (Z=componente vertical) obtenidas para el total de las estaciones de banda ancha analizadas en este estudio. Las curvas corresponden a muestras tomadas a las 12:00 horas del día. Las curvas NHNM y NLNM corresponden al máximo y mínimo nivel de ruido según el modelo propuesto por Peterson (1993).

## ANEXO

*Variación diurna y por estaciones del año del nivel de ruido sísmico presente en nueve de las estaciones de banda ancha que integran la RSN. Las líneas de color rojo identificadas con los códigos NHNM y NLNM representan los niveles máximos y mínimos de ruido sísmico establecidos por Peterson (1993). Z=componente vertical, N=componente norte-sur, E=componente este-oeste.*

