

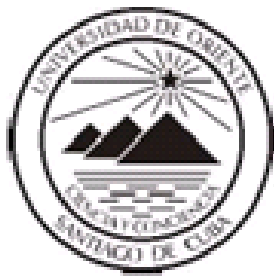
Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones, Informática y Biomédica
Departamento de Telecomunicaciones
Maestría en Sistemas de Telecomunicaciones

**TÍTULO: ANÁLISIS DEL RUIDO SÍSMICO EN EL SERVICIO
SISMOLÓGICO NACIONAL CUBANO**

**Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Sistemas de
Telecomunicaciones**

VIANA POVEDA BROSSARD

**Santiago de Cuba, Octubre 2018
“Año 60 de la Revolución”**



Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería en Telecomunicaciones, Informática y Biomédica
Departamento de Telecomunicaciones
Maestría en Sistemas de Telecomunicaciones

**TÍTULO: ANÁLISIS DEL RUIDO SÍSMICO EN EL SERVICIO
SISMOLÓGICO NACIONAL CUBANO**

**Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Sistemas de
Telecomunicaciones**

**Autora: Ing. Viana Poveda Brossard
Aspirante a Investigador, CENAIS**

**Tutor: Dr. C. Eduardo Rafael Diez Zaldívar,
Investigador Auxiliar, CENAIS**

**Consultante: Dr. C. Arturo Luis Infante Rielo,
Profesor Titular, Universidad de Oriente**

**Santiago de Cuba, Octubre 2018
“Año 60 de la Revolución”**

AGRADECIMIENTOS

Como es usual, una tesis de maestría no solo es resultado del trabajo y esfuerzo de su autor, también de varias personas y/o instituciones que de una manera u otra apoyan o influyen de manera positiva para que la misma llegue a buen término. Por esta razón, este trabajo no está exento de agradecimientos sinceros a todo los que la apoyaron.

Primeramente quiero agradecer a mi tutor el Dr.C. Eduardo Rafael Diez Zaldívar, por su apoyo incondicional durante los tres años de maestría. No solo por su apoyo en la parte académica, al compartir sus conocimientos y en su guía para estructurar el proceso de investigación, sino también por su soporte emocional en los momentos de flaqueza, que me impulsó a seguir adelante en este proyecto.

También a mis compañeros del departamento de instrumentación, por compartir sus conocimientos, que fueron de gran ayuda en todo el proceso de maestría. Por otra parte deseo agradecer al CENAIS como institución por el apoyo brindado para que pudiera obtener el título de Máster en Ciencias, así como a todos los colegas que de algún modo estuvieron interesados en mi progreso durante todo el proceso. No menos importante también agradecer a mi familia por su preocupación y por siempre darme buenas energías y ánimo en el desarrollo de la maestría y el trabajo final en general.

Para concluir es necesario destacar que todo este proceso, me permitió consolidar conocimientos y adquirir otros nuevos que sin duda, han contribuido al desarrollo de habilidades desde el punto de vista profesional.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a todas las personas que confiaron en mí y que apoyaron de una manera u otra la culminación de este proyecto.

PENSAMIENTO

“Nunca consideres el estudio como una obligación sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”.

Albert Einstein

SÍNTESIS

La detección y registro adecuado de los eventos sísmicos con el objetivo de mitigar los efectos destructivos de este tipo de fenómeno natural, es un proceso de particular importancia en los estudios relacionados con los terremotos y la dinámica interna del planeta.

En este sentido, la caracterización de los niveles de ruido en las estaciones de una red contribuye a definir, de forma efectiva, los rangos dinámicos y los niveles de detección real de los instrumentos instalados y de la red en su conjunto.

Además, a través de estos estudios es posible conocer la distribución energética y frecuencial del ruido en los emplazamientos construidos, o en los que se planean construir, y recomendar medidas para la mitigación de los efectos indeseables de este, particularizados en cada caso y teniendo en cuenta las fuentes locales y globales de ruido.

La investigación ofrece:

- (i) El análisis de las principales características de las señales estocásticas en los dominios de tiempo y frecuencia.
- (ii) Un análisis del ruido sísmico, las fuentes que lo generan y los rangos de frecuencia en los que estos se manifiestan.
- (iii) La descripción de los principales modelos de ruido utilizados en sismología como referencia para los estudios relacionados con el mismo.
- (iv) La descripción de los principales métodos para atenuar el ruido en un registro sísmico.
- (v) Los resultados del estudio de ruido realizados a las estaciones de la red del Servicio Sismológico Nacional de Cuba (SSN).

Palabras claves: proceso estocástico, ruido sísmico, densidad espectral de potencia, función de densidad de probabilidades.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
PENSAMIENTO	iii
SÍNTESIS	iv
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ELEMENTOS TEÓRICOS DE LAS SEÑALES ESTOCÁSTICAS. EJEMPLO DEL RUIDO SÍSMICO.....	9
1.1. Procesos y señales estocásticas, características y formas de representación matemática.....	9
1.1.1. Estacionariedad de un proceso estocástico	11
1.1.2. Media, Correlación y Covarianza	11
1.1.3. Análisis en el dominio de la frecuencia	12
1.2. Ruido 13	
1.2.1. Tipos de ruido	14
1.3. Ruido sísmico	16
1.3.1. Ruido sísmico como señal estocástica	18
1.4. Conclusiones parciales	20
CAPÍTULO 2. FORMATO DE DATOS SÍSMICOS, FUENTES GENERADORAS DE RUIDO Y MÉTODOS DE ANÁLISIS	21
2.1. Espectro de la señal sísmica	21
2.2. Canal de registro sísmico.....	23
2.2.1. Sensores	24
2.2.2. Digitalizadores	27
2.3. Formatos de los datos sísmicos	28
2.3.1. Formatos digitales.....	30
2.3.2. Formatos SEED y Miniseed	31
2.4. Fuentes generadoras de ruido sísmico.....	33
2.5. Modelos de ruido.....	37
2.5.1. Modelos basados en mediciones de amplitud (instrumentación analógica) ..	37

2.5.2. Modelos basados en análisis espectral de señales digitales	38
Modelos basados en la determinación de las PSD (Peterson)	39
Modelos basados en la determinación de las PDF (McNamara y Buland)	41
2.6. Influencia del ruido, relación señal-ruido (SNR) y métodos de filtrado y reducción 42	
2.7. El paquete de programas PQLX	44
2.7.1. Preprocesamiento y procesamiento de los datos:	45
2.7.2. Densidad Espectral de Potencia:	48
2.8. Conclusiones parciales	49
CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL RUIDO SÍSMICO EN LA RED DE ESTACIONES DEL SSN CUBANO	50
3.1. La red sísmica cubana	50
3.2. Zona de estudio.....	53
3.3. Selección de los datos.....	53
3.4. Resultados del análisis de las PSD y PDF	54
3.4.1. Comportamiento anual del ruido en las estaciones del SSN	54
3.4.2. Influencia de las variaciones diurnas y nocturnas	62
3.4.3. Efectos de los cambios estacionales (lluvia y seca).....	68
3.4.4. Cambios instrumentales	75
3.5. Recomendaciones para la reducción de los valores de PDS de las señales de ruido en los emplazamientos.....	76
3.6. Conclusiones parciales	80
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
Glosario de abreviaturas.....	91
ANEXOS A.....	92
AnexoA1: Espectro de la señal sísmica y principales instrumentos para su detección [30] 92	
AnexoA2: Respuesta en frecuencia de un péndulo físico [74].....	92
Anexo A3: Ejemplo de formato telegráfico [39].....	93
Anexo A4: Ejemplo de formato GSE [44]	93
Anexo A5: Gráfico de la curva de ruido propio del sensor comparado con los modelos de Peterson [55].....	94
Anexo A6: Modelos de ruido obtenidos por Frantti comparados con Brune y Oliver [56] 94	

Anexo A7: Modelos de ruido, a la izquierda modelo de Brune y Oliver, a la derecha el modelo de Kanai y Tanaka [59]	95
Anexo A8: Tabla de distancias recomendadas entre las estaciones sísmicas y las fuentes de ruido [60]	95
Anexo A9: Gráfico de la PSD de aceleración en dB en la búsqueda del sitio de instalación de la estación Girón (Fondos del CENAIIS, 2018).....	96
Anexo A10: Gráfico de PDF de una estación de pozo en la red del norte de Italia (OGS, 2018) 96	
ANEXOS B.....	97
Anexo B1: Fotografía de los emplazamientos de algunas estaciones del SSN cubano .	97
Anexo B2: Mapa de los principales sistemas de fallas que afectan a Cuba [70]	97
Anexo B3: Mapa de epicentros de terremotos 1959~2017 [71].....	98
Anexo B4: Mapa de los sistemas de fallas en la zona oriental de Cuba [75].....	98
Anexo B5: Mapa de estaciones usadas en el estudio propuesto [75]	98
Anexo B6: Valores medios de las PSD para las estaciones RCC, NMDO y MOAC	99
Anexo B7: Valores medios de las PSD para las estaciones MGCV, MARV y LMGC..	100
Anexo B8: Valores medios de las PSD para las estaciones CHIV, HLG y CCCC.....	101
Anexo B9: Valores medios de las PSD para las estaciones SOR y CAMR.....	102
Anexo B10: Mapa de la trayectoria del huracán Matthew [73]	102

Índice de figuras

1.1.	Ejemplo gráfico de señales aleatorias.....	12
1.2.	Registro de un terremoto en la costa de Centroamérica, magnitud 6.1, estación Chivirico (CHIV) del SSN	16
1.3.	Registro con alto nivel de ruido en la estación Las Mercedes, (LMGC)	17
2.8.	Estructura de un canal de registro sísmico.....	23
2.8.	Esquema simplificado de un péndulo mecánico del tipo masa-resorte.....	26
2.8.	Comparación entre los modelos originales de ruido de Peterson y los NLNM y NHLM.....	39
2.8.	Curvas resultantes de los modelos de PDF, correspondientes al registro de la componente vertical.....	41
2.8.	Señal sin filtrar y la misma señal filtrada. En esta última se puede apreciar la mejora de la SNR y por ende una mejor observación de algunas de las fases de la señal	42
2.8.	Detección de una explosión nuclear débil bajo suelo por un arreglo de trece sensores en Alemania.....	43
2.8.	Ventana principal del programa PQLX.....	48
2.8.	Ventanas auxiliares del programa PQLX, de arriba hacia abajo, selección de una señal específica, amplificación de una parte de esta y cálculo del espectro del tramo seleccionado.....	48
3.1.	Mapa de la red de estaciones del SSN cubano	51
3.2a, b, c, d, e, f.	Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones RCC, NMDO, MOAC, MG, V, MASC y MARV (variación anual)	56
3.3a, b, c, d, e, f.	Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones LMGC, CHIV, HLG, CCCC, SOR y CAMR (variación anual)	60
3.4.	Variación mensual del valor de las PSD, durante 2016, para las estaciones de la red sísmica cubana	62
3.5a, b, c, d, e, f, g, h.	Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones RCC, NMDO, MOAC y MG, V (variación diurna/nocturna)	64
3.6a, b, c, d, e, f, g, h.	Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones MASC, MARV, LMGC y CHIV (variación diurna/nocturna)	66
3.7a, b, c, d, e, f, g, h.	Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones HLG, CCCC, SOR y CAMR (variación diurna/nocturna)	67
3.8a, b, c, d, e, f, g, h.	Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones RCC, NMDO, MOAC y MG, V (variación estacional)	69
3.9a, b, c, d, e, f, g, h.	Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones MASC, LMGC, CHIV y HLG (variación estacional)	70
3.10a, b, c, d, e, f.	Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones CCCC, SOR y CAMR (variación estacional)	71

3.11. Gráficos PDF correspondientes a las estaciones RCC, MARV y NMDO durante el paso del huracán Matthew	72
3.12. Espectrograma correspondiente a la estación MARV.....	73
3.13. Gráficos PDF correspondientes a las estaciones SOR y CAMR durante el paso de un frente frío	74
3.15. Gráficos PDF correspondientes a la estación CAMR afectada por cambio instrumental.....	75

Índice de tablas

2.1. Rangos de frecuencia de las señales sísmicas	22
2.2. Principales formatos de datos empleados en sismología.....	31
3.1. Estaciones de la red sísmica del SSN seleccionadas para el estudio de ruido....	52

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería es común que las señales o variables que se desean estudiar, registrar, procesar o controlar estén contaminadas por diferentes tipos de otras señales que se enmarcan, a los efectos del objetivo principal de la investigación que se desarrolla en cada caso, dentro del concepto de ruido.

Estas son perturbaciones de carácter aleatorio y multi-causal que aparecerán siempre en cualquier canal de medición y/o transmisión de señales o datos y se definen, de forma general, como cualquier señal que en un contexto específico y dentro de un conjunto de datos no es relevante, distorsionando y/o degradando las señales de interés e impidiendo o limitando el estudio de la misma [1].

El propio concepto de ruido es relativo en sí mismo pues depende fundamentalmente del objetivo que se pretende, desde el punto de vista ingenieril, al procesar las señales y cuáles de ellas se consideran información relevante en cada caso. Es por esto que la tipología e influencia de la señal que se denomina como ruido cambia. Solo cuando se quiere caracterizar o analizar a una señal de ruido en sí misma con un objetivo específico, se considera que esta es la señal de interés o importancia [2].

Debido justamente a su propia naturaleza, los efectos del ruido son prácticamente imposibles de eliminar y en general se clasifican y estudian para su mitigación. En este sentido, en la literatura se acepta su clasificación en dos grandes categorías [2]:

- Ruido correlacionado: Aquel que se relaciona mutuamente (se correlaciona) con la señal útil y es dependiente, en un circuito, de la existencia de esta.

- Ruido no correlacionado: Aquellos que son independientes de la señal y existen en su ausencia o en su presencia. La señal es perturbada por ellos, y no los determina.

En el campo de estudio de la sismología es importante subrayar que actualmente, debido al desarrollo acelerado de la electrónica, de nuevos y más precisos instrumentos y con la introducción de técnicas y algoritmos digitales de procesamiento de señales, reviste particular importancia, por todo lo que implica un terremoto de gran magnitud desde el punto de vista social y económico, el procesamiento de las señales procedentes de estos fenómenos naturales y por consiguiente la caracterización de las fuentes de ruido que puedan afectarla.

Aunque la sismología es un área del conocimiento muy específica, cuenta con varias líneas de investigación entre ellas el monitoreo sísmico, peligro sísmico, instrumentación, ingeniería sísmica, procesamiento e intercambio de datos, régimen de estrés y mecanismos de las fuentes sísmicas, entre otros [3].

El estudio del ruido sísmico se encuentra relacionado con estas líneas de trabajo, constituyendo un campo de investigación abordado a nivel mundial por diversos investigadores. Debido a que la señal detectada por los sensores de una red sismológica siempre contiene un porcentaje variable de ruido sísmico y, aunque años atrás este fenómeno no era tan estudiado como en la actualidad, en años recientes y con el objetivo de reducir al mínimo el umbral de detección de las redes sísmicas y mejorar la calidad de la señal de datos, se han potenciado las investigaciones relacionadas con esta temática [4].

Por otra parte, la caracterización de los diferentes niveles de ruido asociados a las zonas de interés económico y social afectadas por el peligro sísmico, también se estudia para comprender fenómenos asociados a otros tipos de investigaciones relacionadas con la sismología y la geología, con el objetivo de conocer mejor la estructura tectónica de la Tierra y entender con mayor detalle los procesos que allí ocurren [5].

A lo largo del desarrollo de la sismología instrumental y tomando en consideración los avances científico-técnicos en esta esfera, numerosos autores han abordado el problema del ruido sísmico y han elaborado modelos que sirven como referencia para evaluar este fenómeno.

En tal sentido se pueden mencionar los trabajos publicados por Brune y Oliver en 1959 y Frantti en 1962, a partir de datos registrados por estaciones de tecnología analógica y décadas después se destaca el aporte de Peterson, quien aprovechando la introducción en las estaciones de la tecnología digital y por tanto la posibilidad de realizar los análisis espectrales de las señales de ruido, publicó sus modelos de ruido, que aún en la actualidad siguen considerándose como paradigma para los estudios de ruido en las estaciones sismológicas [6].

Finalmente, en 2004, McNamara y Buland, desarrollaron una nueva aproximación al problema del ruido a partir de la aplicación del concepto de Función de Densidad de Probabilidades, Probability Density Function (PDF), que toma como base de datos inicial para el análisis, la función de Densidad Espectral de Potencia, Power Spectral Density (PSD) de estaciones pertenecientes a la U.S National Seismograph Network (USNSN) y el Advanced National Seismic System (ANSS), constituyendo esta aproximación el estándar de facto usado en estos momentos a nivel internacional [7].

El SSN cubano cuenta con una red de estaciones digitales que abarca todo el país, en total 20 [8], ubicadas en su mayoría en la región oriental debido a la alta sismicidad en esta parte de la isla [9].

En las estaciones está instalado un equipamiento que comprende sismómetros de banda ancha y de corto período, además de algunos acelerómetros. Generalmente, los emplazamientos para la instalación de las estaciones se seleccionan a partir de criterios geológicos y sismológicos, teniendo en cuenta las zonas de mayor sismicidad y por tanto

mayor peligro sísmico, debiéndose garantizar que los niveles de ruido sean mínimos o afecten lo menos posible la señal registrada [10].

En esta red existen emplazamientos para la instalación de estaciones sísmicas que han sido construidos años atrás, en los cuales se instalaron fundamentalmente sismómetros de corto período destinados al registro de terremotos locales que, por sus características propias de diseño y baja sensibilidad, minimizan la incidencia del ruido en los registros de estos sitios. Sin embargo en la actualidad, después de la modernización tecnológica y la instalación en estos sitios de sensores de banda ancha, mucho más sensibles y con un ancho de banda mayor, se han observado niveles de ruido que inciden desfavorablemente en el registro de los modernos sistemas sísmicos y en la calidad del dato final.

En paralelo, recientemente se han construido nuevos emplazamientos para estaciones sísmicas en donde no se han tenido en cuenta, o se han violado por diferentes motivos, las recomendaciones internacionales y las buenas prácticas sobre esta materia.

Esta situación, unida a la obsolescencia de los emplazamientos descrita anteriormente, ha provocado que el resultado final de la adquisición de la señal sísmica, en este caso las trazas en tiempo cuasi real de las estaciones, no siempre corresponden completamente con varios de los estándares internacionales de calidad [11], [12].

Por tanto, el **problema de la investigación** es la no existencia en el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS) de estudios relacionados con el ruido en las estaciones de la red cubana, que permitan identificar las fuentes que lo generan, los rangos de frecuencias en que se manifiestan, así como su incidencia en la calidad de la señal sísmica registrada.

Teniendo en cuenta lo anterior se propone como **tema de la investigación** “Análisis del ruido sísmico en la red del Servicio Sismológico Nacional Cubano”. La realización de este

estudio dotará al SSN de una investigación útil que permita establecer consideraciones y soluciones para las estaciones en general, además de obtener datos que sirvan de variables de entrada para investigaciones posteriores sobre el nivel de detección real de la red cubana.

Como punto de partida para el desarrollo de este trabajo se considera como **hipótesis** que mediante un estudio del ruido de la red de estaciones del SSN es posible caracterizar sus componentes energéticas, espectrales y estadísticas y de esta forma reducir su influencia negativa en la calidad del dato final.

Por todo esto, el **objeto de investigación** es el ruido que aparecen en el registro de las señales sísmicas y la influencia de este en la detección de los terremotos, mientras que el **campo de la investigación** es el estudio de los métodos y procedimientos no realizados antes en Cuba para la estimación de las fuentes de ruido en las estaciones sismológicas.

El **objetivo** general de esta investigación es realizar un estudio que permita caracterizar el ruido que afecta la señal sísmica en la red del SSN.

Objetivos específicos:

- Caracterización de los tipos de ruido, los rangos de frecuencia en los que se manifiesta y las fuentes que lo originan.
- Análisis estadístico del ruido a partir de la determinación de las funciones PSD y PDF.
- Proponer medidas para la atenuación del ruido sísmico de fondo.

Tareas de la investigación:

- Análisis de los fundamentos teóricos del ruido. Estudio de las características del ruido sísmico y de los métodos para el análisis del mismo.
- Cálculo de las PSD y PDF de las estaciones sismológicas incluidas en el estudio.
- Determinación de las fuentes de origen de la señal de ruido y sus rangos de frecuencia en las estaciones sísmicas, en función de los diferentes períodos del año (períodos de lluvia y seca) y teniendo en cuenta las variaciones entre el día y la noche.

- Análisis estadístico de las componentes de ruido en cada uno de los emplazamientos.
- Proponer medidas para aumentar la relación señal a ruido.

Como métodos de investigación empleados se destaca **el método histórico-lógico** usado al profundizar en los fundamentos teóricos del ruido en general y en las características del ruido sísmico. Esto permitió conocer los diferentes autores que abordaron el tema, sus teorías y aportes a la sismología.

Además, se analizaron los métodos para el estudio del ruido en las estaciones sismológicas y se consultaron algunas experiencias recientes en diferentes redes sismológicas a nivel mundial en los últimos años, aplicando también **el método de análisis y síntesis** en el resumen de las causas y orígenes de las diferentes fuentes del ruido sísmico y en los estudios realizados en otros contextos.

También se empleó **el método de inducción-deducción**, que permitió integrar los datos y la información obtenida sobre las fuentes del ruido sísmico y los métodos usados para su análisis, para generar nuevos conocimientos lo que posibilitó exponer las bases de un nuevo estudio aplicado a las condiciones de la red sísmica cubana, así como **el método de modelación**, que se usó al aplicar las bases teóricas de los procedimientos de determinación de las funciones de PSD y obtener los correspondientes gráficos y variables estadísticas.

El **método de medición y experimentación** fue usado a partir de mediciones de ruido en las diferentes estaciones sismológicas en todas las estaciones del año, las 24 horas del día, durante todo un año.

Aportes y novedad

La **novedad científica** del trabajo radica en desarrollar, por primera vez en Cuba, una investigación que permita realizar la caracterización de las señales de ruido que afectan la calidad de los datos sísmicos, como elemento de partida para posteriores investigaciones

relacionadas con el tratamiento de señales sísmicas, filtrado digital y post-procesamiento de estas señales.

Contribución teórica: Realización, por primera vez en Cuba, de un estudio sobre el ruido en las estaciones sismológicas que, a partir del uso de técnicas de procesamiento digital de señales y métodos estadísticos, permita identificar los niveles de ruido en las estaciones de la red sísmica cubana, sus componentes frecuenciales y cómo se comportan estadísticamente con el objetivo de, una vez determinados estos parámetros, incidir con recomendaciones y medidas concretas en la mejora del dato sísmico.

Contribución práctica: La contribución práctica del tema es la determinación de los valores reales de energía de las señales de ruido y su distribución espectral en las estaciones sismológicas de la red cubana, a partir del análisis estadístico del ruido. Los resultados que se obtengan a partir de este estudio serán de gran importancia para la selección correcta de los nuevos emplazamientos para la instalación de estaciones sismológicas en el país y son parte fundamental de un proyecto de investigación científica de alcance nacional que está siendo ejecutado bajo la dirección del CENAIIS.

Contribución económica: El ahorro económico que se deriva de los resultados obtenidos, a partir de una futura adecuada selección de los emplazamientos con respecto a los niveles de ruido, constituye alrededor del 50 % del presupuesto de cada estación, esto es posible evitando la necesidad de realizar cambios de emplazamientos por errores cometidos durante el proceso previo a la construcción de una estación sismológica.

Contribución social: Elaboración, a partir de un dato instrumental de mayor calidad, de estrategias más eficaces para la mitigación del riesgo sísmico y la protección de las vidas y bienes materiales de las personas que viven en las zonas de mayor peligro sísmico en el país.

Estructura del informe investigativo:

El informe está formado por la introducción, el desarrollo estructurado en tres capítulos, las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos de investigación, las referencias bibliográficas y los anexos correspondientes que permiten precisar y ampliar la información brindada en el informe.

En el **Capítulo 1** se exponen los fundamentos teóricos de los procesos estocásticos y la forma de analizar estos, particularizándose en el ruido sísmico como un ejemplo de este tipo de proceso. Los detalles de la señal sísmica, su espectro de frecuencias, los diferentes elementos que constituyen el canal de registro sísmico y los formatos de datos utilizados a nivel mundial, con el objetivo de identificar el origen y las fuentes del ruido sísmico y los rangos de frecuencias en los que se distribuye su espectro son objeto de estudio en el **Capítulo 2**. Un análisis estadístico del ruido en las estaciones sísmicas cubanas, teniendo en cuenta variaciones en el año, entre el día y la noche, bajo la influencia de cambios climáticos y de la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos y a causa de cambios instrumentales en el canal de registro se realiza en el **Capítulo 3**. Además se proponen algunas recomendaciones para mejorar la relación señal a ruido en los emplazamientos.

CAPÍTULO 1. ELEMENTOS TEÓRICOS DE LAS SEÑALES ESTOCÁSTICAS. EJEMPLO DEL RUIDO SÍSMICO.

En este capítulo se presentan los elementos teóricos que caracterizan al ruido como perturbación que afecta a un sistema dado, en este caso haciendo énfasis en los sistemas de adquisición y registro sismológicos.

Se exponen las ecuaciones que permiten analizar al ruido como una señal estocástica en los dominios del tiempo y de la frecuencia, particularizándose en las principales expresiones matemáticas que la definen.

Además se particularizan estas expresiones para el caso de la señal de ruido sísmico, como señal de tipo estocástico que afecta de forma continua la adquisición de datos en la sismología.

1.1. Procesos y señales estocásticas, características y formas de representación matemática

El conocimiento de las bases fundamentales de los procesos aleatorios, tiene una amplia gama de aplicaciones en diferentes campos de la ciencia, y es de gran utilidad sobre todo para los ingenieros, ya que permite representar y simular estos procesos que son parte de la vida del hombre [13].

Tienen gran aplicación en los sistemas de comunicaciones, en la biomédica, en la sismología, pero también en el tratamiento y manejo digital de señales en general, como el ruido [14].

Su principal característica es que son funciones del tiempo definidas dentro de un intervalo de observación y tienen como propiedad fundamental el hecho de que, antes de realizar cualquier análisis que las incluya, no es posible describir su forma exacta. Un proceso aleatorio $X(t)$, se define como un conjunto de variables aleatorias de distribución conjunta $\{x(t)\}$, en el tiempo. Si el conjunto de valores de t es continuo, entonces el proceso es considerado un proceso aleatorio continuo. Si por el contrario estos valores son números enteros, se está en presencia de un proceso estacionario discreto [15].

Si se describe un proceso aleatorio $X(t)$, se puede observar que cada punto muestra del espacio es una función del tiempo, mientras que el espacio de muestreo o el conjunto total de las funciones posibles en el tiempo se define como proceso estocástico o aleatorio.

De este análisis se puede considerar un proceso estocástico como un conjunto de funciones del tiempo, junto con unas reglas de probabilidad que asignan una probabilidad a cualquier evento significativo asociado con la observación de una de esas funciones; figura 1.1.

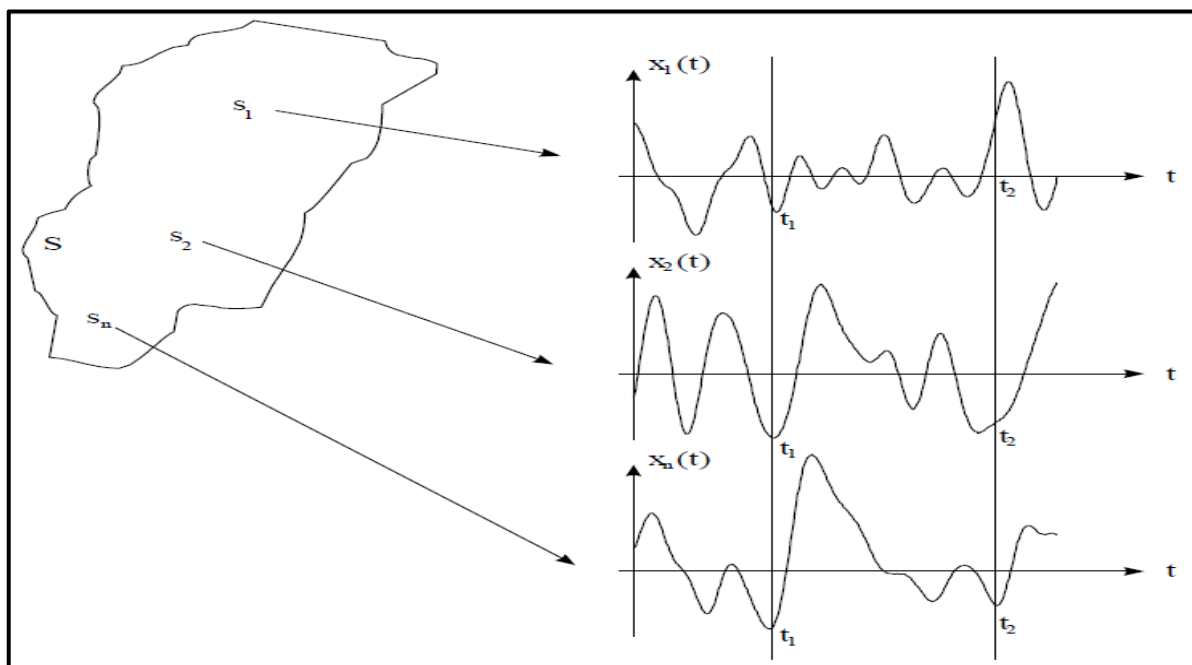


Figura 1.1: Ejemplo gráfico de una señal aleatoria [16]

Todo proceso estocástico $X(t)$ implica la existencia de infinitas variables aleatorias no cuantificables para cada instante del tiempo fijado t en el intervalo $-\infty < t < \infty$.

Por tanto se puede estimar la función de distribución de la variable aleatoria $x(t_1)$ fijando $t = t_1$, a partir de la ecuación (1-1):

$$F_{x(t_1)}(x_1) = P(X(t_1)) \leq x_1 \quad (1-1)$$

1.1.1. Estacionariedad de un proceso estocástico

El proceso estocástico $x(t)$ se dice que es estacionario en sentido estricto o estrictamente estacionario si la función densidad de probabilidad conjunta es invariante en el dominio del tiempo es decir si esta función es la misma para todos los instantes de tiempo.

Sin embargo, una forma de uso común en procesamiento de señales es la llamada estacionariedad débil o estacionariedad en sentido amplio (ESA). Un proceso estocástico ESA solo requiere que la función densidad de probabilidad conjunta no varíe durante dos instantes de tiempo consecutivos. Todo proceso estacionario en sentido estricto que tenga media y varianza definidas, es también un proceso ESA [16].

1.1.2. Media, Correlación y Covarianza

En ocasiones no es posible determinar la función de distribución conjunta de un proceso aleatorio y, en ese caso, es perfectamente posible realizar el análisis del mismo a partir de una descripción parcial de la función de distribución.

En este caso, las funciones media, correlación, auto correlación, varianza y covarianza ofrecen una descripción válida para el análisis de un proceso estocástico real.

De tal forma, para un proceso estocástico $X(t)$, se define la media o valor medio como una función determinística de la forma siguiente [17], [18], [19]:

$$m_X(t_k) = E[x(t_k)] \quad (1-2)$$

donde E es la esperanza matemática y $x(t_k)$ es la variable aleatoria obtenida observando el proceso $X(t)$ en $t = t_k$.

En el caso de que la función de densidad de probabilidad de $x(t_k)$ sea $f_{x(t_k)}(x)$, la media se puede calcular de acuerdo a la expresión (1-3).

$$m_X(t_k) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_{x(t_k)}(x) dx \quad (1-3)$$

La función de auto-correlación del proceso $X(t)$ como función de dos variables temporales t_k y t_i se define en la ecuación (1-4) como:

$$R_x(t_k, t_i) = E[x(t_k)x(t_i)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xy f_{X(t_k), X(t_i)}(x, y) dx dy \quad (1-4)$$

Para este mismo proceso, la función de auto covarianza se expresa en la ecuación (1-5)

$$\begin{aligned} K_X(t_k, t_i) &= E[(X(t_k) - m_x(t_k))(X(t_i) - m_x(t_i))] \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} (x - m_x(t_k))(y - m_x(t_i)) f_{X(t_k), X(t_i)}(x, y) dx dy \end{aligned} \quad (1-5)$$

En el caso de procesos ESA, el análisis para este tipo de procesos se simplifica, ya que depende solo de la diferencia de tiempo, $\tau = t_1 - t_2$ [17].

La función media mostrada en la ecuación (1-2) no depende del instante de tiempo, resulta constante y queda simplificada como:

$$m_x(t_k) = m_x \quad (1-6)$$

Para la función de auto-correlación y teniendo en cuenta esta condición, se puede simplificar la ecuación (1-4) de la forma:

$$R_x(\tau) = E[x(t + \tau)x(t)] = E[x(t)x(t - \tau)] \quad (1-7)$$

Finalmente, la función de auto covarianza también depende solo de la diferencia de tiempos y se expresa como:

$$K_X(\tau) = K_X(t_k, t_i) = K_X(t_k - t_i) \quad (1-8)$$

1.1.3. Análisis en el dominio de la frecuencia

En el dominio de la frecuencia se analiza el proceso usando el teorema de Wiener-Khintchine, a través de la función de espectral de potencia (PSD), que es una función de frecuencia real, que caracteriza la contribución de potencia de un proceso aleatorio a partir de sus componentes en cualquier intervalo de frecuencia. Se define matemáticamente como la transformada de Fourier de la función de auto-correlación, o sea:

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} dt \quad (1-9)$$

La función de auto-correlación y las PSD contienen fundamentalmente la misma información sobre la señal, ya que la transformada de Fourier de la función de auto-correlación es una transformación matemática bi-unívoca, [20], [21].

Para un proceso estacionario discreto $a(k)$, donde k es un entero, la media y la auto-correlación se definen como:

$$\bar{a} = E[a(k)] \quad (1-10)$$

$$R_{aa}(m) = E[a(k+m)a^*(k)] \quad (1-11)$$

La PSD, viene dada por la transformada discreta de Fourier de la función de auto correlación, de la forma:

$$S_{aa}(f) = \sum_m^{\infty} R_{aa}(m)e^{-j2\pi mTf} \quad (1-12)$$

1.2. Ruido

Se puede definir el ruido como todo aquello que, en un conjunto de datos, señal, imagen o información en general no es de interés o se decide que “no es de interés” o irrelevante, y/o degrada, contamina o distorsiona la señal útil e impide o limita el estudio o uso de tal información.

Las fuentes de ruido son disímiles, con diferentes amplitudes y rangos de frecuencia, por lo que son procesos aleatorios estudiados utilizando los métodos de análisis de señales estocásticas.

En un canal de medición y/o transmisión de datos, el ruido puede existir antes, durante o después del registro y adquisición de lo que consideramos señal útil, puede ser generado por el sensor, los sistemas de registro y transmisión y también por los procesos de codificación, modulación, interpretación y procesamiento.

El ruido no sólo incluye fluctuaciones desde muy suaves (offset, bajas frecuencias, deriva o gradientes), hasta aquellas muy abruptas (altas frecuencias), sino que también comprende

señales coherentes y “limpias”, pero cuya información no es relevante a un estudio específico y que se convierten, a este efecto, en ruido.

1.2.1. Tipos de ruido

El ruido se puede clasificar en dos tipos, ruido correlacionado y ruido no correlacionado, el correlacionado se relaciona mutuamente con la señal y no existe a menos que haya una señal de entrada. Se produce por distorsión no lineal e incluye los siguientes tipos:

- Distorsión armónica

Hay distorsión armónica cuando se producen los armónicos no deseados de una señal, debido a una amplificación no lineal (mezclado), se define como la raíz del valor cuadrático medio, Root Mean Square (RMS) combinada de los armónicos superiores, dividida entre la amplitud (RMS) de la frecuencia fundamental. La ecuación matemática de la distorsión armónica total, (total harmonic distortion) (THD) se muestra en:

$$\%THD = \frac{V_{sup}}{V_{fundamental}} \times 100 \quad (1.13)$$

Dónde: %THD es distorsión armónica porcentual total, $V_{superior}$ es la raíz de la suma cuadrática de los voltajes (RMS) de los armónicos superiores de la frecuencia fundamental $\sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}$ y $v_{fundamental}$ es el voltaje (RMS) de la frecuencia fundamental.

- Por intermodulación

Es la generación de frecuencias indeseables de suma y diferencia, cuando se amplifican dos o más señales en un dispositivo no lineal; ejemplo: un amplificador de señal. Aquí la importancia la tiene la palabra indeseable, porque en los circuitos de comunicaciones a menudo se desea mezclar dos o más señales y producir las

frecuencias de suma y diferencia. Éstas son las llamadas frecuencias de productos cruzados. Para que haya distorsión por intermodulación deben de existir dos o más señales de entrada.

El ruido no correlacionado, a su vez, puede ser clasificado en:

- Externo

Generado fuera de cualquier equipo o circuito. Es originado por la atmósfera, fuera de la atmósfera y por el hombre. El ruido atmosférico es provocado por perturbaciones eléctricas naturales que se generan dentro de la atmósfera terrestre. Es conocido como electricidad estática y es relativamente insignificante a frecuencias mayores de 30 Hz. Lo que es conocido como ruido extraterrestre es producido por señales eléctricas originadas fuera de la atmósfera de la Tierra y se origina en la Vía Láctea, en otras galaxias y en el Sol.

Los ruidos causados por el hombre tienen como principales fuentes los mecanismos que producen chispas como los generadores y conmutadores de energía eléctrica, los conmutadores de los motores eléctricos, los sistemas de encendido automotriz, entre otros.

- Interno

Generado dentro de un dispositivo o circuito y se puede clasificar en tres tipos, ruido de disparo, ruido térmico y ruido de tiempo de tránsito. El ruido de disparo se debe a la llegada aleatoria de portadores al elemento de salida de un dispositivo electrónico, como por ejemplo los diodos y los transistores [22].

A la modificación de una corriente de portadores cuando estos pasan de la entrada a la salida de un dispositivo electrónico, produciendo una variación irregular y aleatoria se le llama ruido de tiempo de tránsito.

Por otra parte, el ruido térmico, muy conocido y abordado en muchas literaturas técnicas, es el movimiento aleatorio de los electrones libres dentro de un conductor causado por la agitación térmica.

1.3. Ruido sísmico

Las señales sísmicas se originan debido a procesos de rupturas, subducciones y desplazamientos abruptos de la corteza terrestre relacionados con la dinámica del planeta. A partir del foco o hipocentro del sismo, se generan ondas en todas direcciones que son afectadas, fundamentalmente, por dos grandes partes, el medio de propagación de estas ondas, en este caso las diferentes capas que conforman la tierra [23], [24] y en segundo lugar por los instrumentos que conforman el sistema de detección y procesamiento de estas señales.

Por lo tanto, todas estas señales resultan afectadas, en su tránsito, por diferentes tipos de ruido que se pueden dividir en ruido instrumental y ruido sísmico. Normalmente, el ruido instrumental tiene un nivel menor que el ruido sísmico pero esto en ocasiones, no es completamente cierto pues muchas estaciones poseen niveles de ruido ambiental muy bajos [25], [26].

Cuando el registro de una estación sismológica es observado en presencia de un terremoto de gran magnitud, es fácil determinar que es ruido sísmico y cuál es la señal sísmica de interés. El ruido, como se puede constatar en la figura 1.2, es toda la parte de la señal del registro, que no es el terremoto y por lo tanto no aporta ninguna utilidad en el marcaje de las fases principales del registro para su posterior análisis.

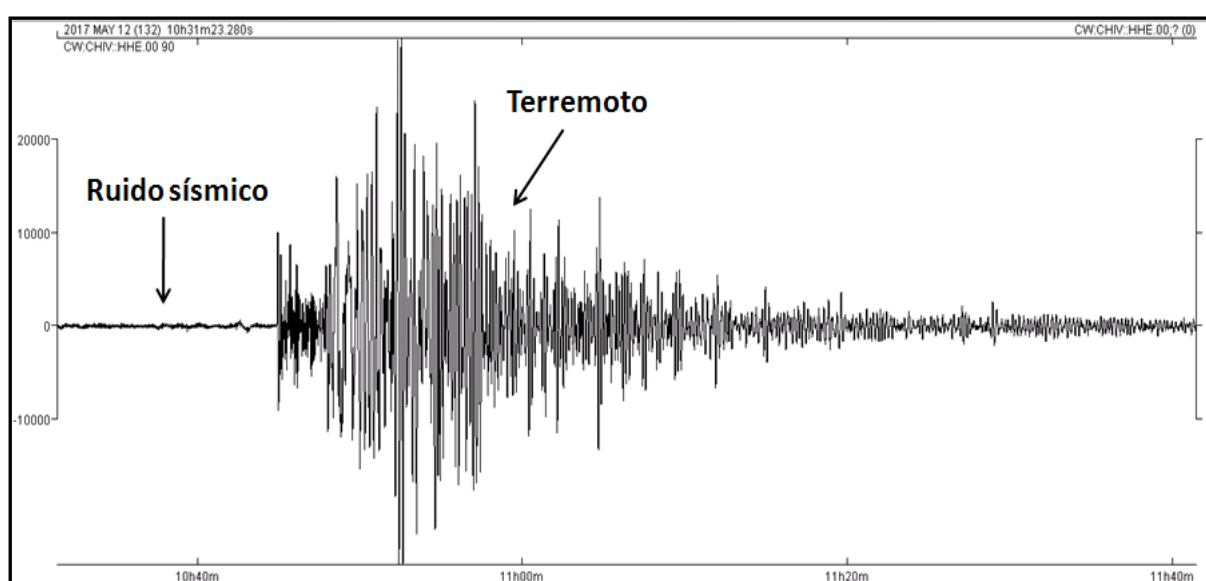


Figura 1.2: Registro de un terremoto en las costas de Centro América de magnitud 6.1, estación Chivirico (CHIV) del SSN [9]

Como cualquier otro tipo de ruido, el ruido sísmico, es una señal no determinística, por lo que su comportamiento no se puede describir por ninguna ley matemática, para su estudio se emplean procedimientos estadísticos. Es causado por diferentes fuentes espacialmente distribuidas, casi siempre continuas y que mayoritariamente no se relacionan entre sí, por lo que se considera un proceso estocástico estacionario sin un espectro de fase definido [26].

El análisis del ruido en la actualidad, se ha convertido en uno de los temas más novedosos abordados en sismología, esto es debido a que a partir de estos estudios se obtienen no solo consideraciones sobre los niveles de detección de las redes así como la identificación de los tipos de ruido predominantes en cada emplazamiento y las frecuencias en que estos se manifiestan, sino que también se usa como señal de análisis primaria para realizar otras investigaciones sismológicas [25], [26].

Las señales de ruido brindan una oportunidad única para poder realizar estudios geológicos que permitan conocer mejor la estructura interna de la Tierra, debido a la imposibilidad tecnológica del hombre para realizar perforaciones profundas y mediciones directas de las capas de la Tierra. También se utiliza en investigaciones aplicadas en la ingeniería sísmica, con el objetivo de conocer las propiedades dinámicas de las estructuras y el suelo ante un terremoto fuerte.

De cualquier forma, un alto nivel de ruido en una estación sísmica, puede dificultar el análisis de un sismo de baja magnitud o enmascararlo completamente impidiendo su detección. En la figura 1.3 se muestra la influencia del ruido en un registro sísmico, en el cual el alto nivel de ruido, dificulta el análisis del terremoto [9].

Debido a esto, investigadores de diversos países han estudiado el ruido sísmico pues es un factor fundamental en la evaluación y control de la calidad de una estación sísmica. Por tanto, conocer sus características así como las fuentes que lo originan, sus frecuencias

predominantes y probabilidad de ocurrencia en el tiempo, son elementos esenciales en la valoración y mejoramiento de la calidad del dato final.

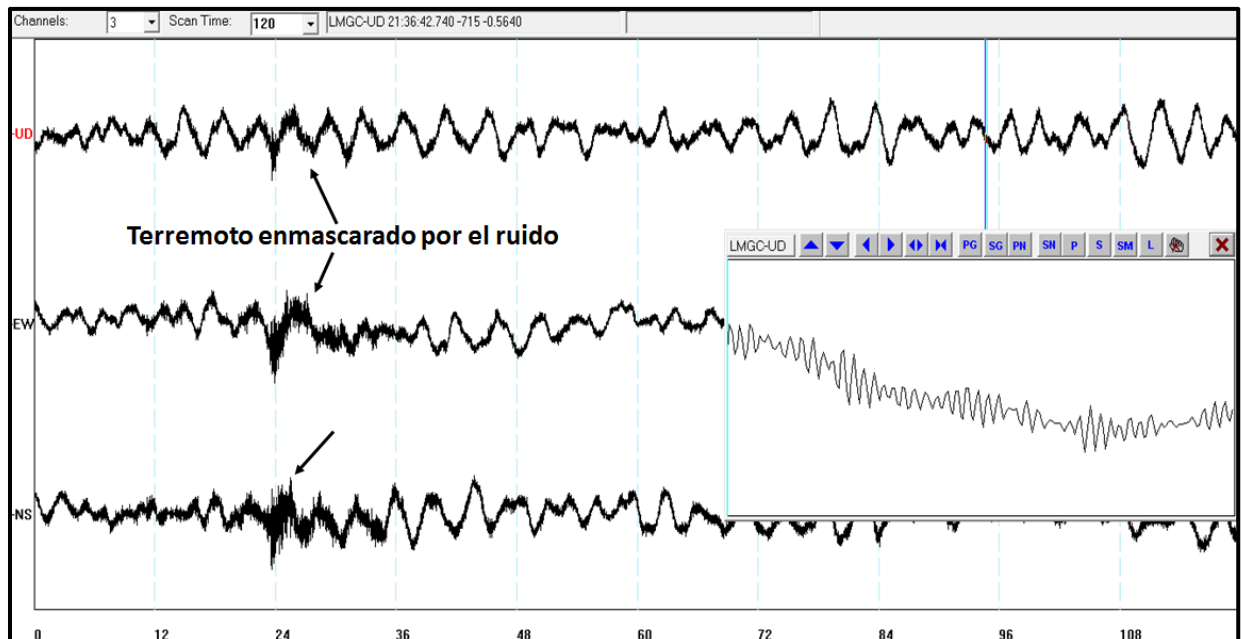


Figura 1.3: Registro con alto nivel de ruido de la estación Las Mercedes (LMGC) [9]

Por otro lado, los estudios de ruido constituyen una parte esencial del trabajo previo a la elección de los emplazamientos donde se pretende instalar nuevas estaciones sísmicas, siendo muchas veces, determinante en la selección o no de estos. Además permite calcular el umbral de detección a partir del dato registrado por los instrumentos, de una red sísmica, el cual es determinado, en gran medida, por el ruido sísmico de fondo [27].

1.3.1. Ruido sísmico como señal estocástica

Debido a que el ruido sísmico también es un proceso estocástico, no es posible calcular su densidad espectral de amplitud ni su espectro de fase. En su lugar se calcula la función PSD de ruido $P(\omega)$, que es la transformada de Fourier de la función de auto-correlación de la señal de ruido:

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1-14)$$

Donde $\omega = 2\pi f$

La función que se analiza puede ser desplazamiento, velocidad o aceleración del terreno, por lo que la PSD $P(\omega)$, en dependencia de tipo de función se expresa en $m^2/Hz, (m/s)^2/Hz$ o en $(m/s^2)^2/Hz$ respectivamente.

Se ha convertido en un convenio, representar en sismología, el espectro de ruido como la función PSD de ruido en aceleración, $Pa(\omega)$.

Como es común representar el espectro de ruido en dB referido a $1 (m/s^2)^2/Hz$, el nivel de ruido entonces se calcula como:

$$Pa[dB] = 10 \log [Pa(\omega)/(m/s^2)^2/Hz] \quad (1-15)$$

La amplitud máxima de una señal $f(t)$, con $t = 0$ puede ser aproximada, por el producto de la densidad espectral de amplitud y el ancho de banda donde está definida la señal como muestra la ecuación (1-16).

$$f(t)_{t=0} = |P(\omega)|^2 (f_u - f_l) \quad (1-16)$$

De igual modo, aplicando el Teorema de Parseval, si la función PSD de ruido $P(\omega)$, definida en el intervalo de frecuencia $-\infty < \omega < +\infty$, se define en $\omega_l < \omega < \omega_u$, se puede considerar constante y que $P(\omega) = P$, además $P(\omega) = 0$ fuera de este rango de frecuencia.

Si lo anterior se cumple entonces la amplitud cuadrática media del ruido en el tiempo está dada por la expresión (1-17)

$$\langle f^2_{(t)} \rangle = 2P (f_u - f_l) \quad (1-17)$$

La raíz cuadrada de esta potencia es la raíz cuadrática media, (RMS), se expresa como:

$$a_{RMS} = \{2P(f_u - f_l)\}^{1/2} \quad (1-18)$$

Si la potencia de ruido no se calcula de acuerdo al enfoque matemático, basado en notación compleja, si no solo a partir de frecuencias positivas, entonces $P = 2P$, debido a que $P(-\omega) = P(+\omega)$. Teniendo en cuenta esto, la amplitud se muestra en (1-19).

$$a_{RMS} = \{P(f_u - f_l)\}^{1/2} \quad (1-19)$$

Cuando se determinan las amplitudes a_{RMS} , basado en la expresión anterior, entonces hay un 95% de probabilidad de que las amplitudes máximas instantáneas de una señal aleatoria con distribución de amplitud Gaussiana, se encuentre en un intervalo de $2 a_{RMS}$ [26].

Aunque la forma actual de evaluar el ruido en las estaciones sismológicas es a partir de las densidades espectrales de potencia de aceleración, en ocasiones, resulta muy útil conocer las amplitudes reales en micrómetros del ruido local en una estación y es mediante las ecuaciones descritas anteriormente, que este proceso puede realizarse.

1.4. Conclusiones parciales

Luego de realizar de una manera amplia el análisis del ruido como proceso estocástico y particularmente la incidencia del ruido sísmico en la señal registrada procedente de un terremoto, se puede concluir diciendo que:

- Se corrobora que los procesos y señales estocásticas solo pueden ser descritos a través de funciones estadísticas. En el tiempo a través de la media, auto-correlación y varianza y en frecuencia, mediante el uso de la función PSD.
- Se comprueba que el ruido tiene un origen multi-causal, donde influyen elementos internos y externos, lo cual complica su análisis como fenómeno natural.
- Se demuestra que el ruido sísmico influye en el registro de una señal sísmica, contaminándola y disminuyendo el umbral de detección real de una red, por lo cual es necesario cuantificar la potencia de este y las frecuencias predominantes donde se manifiesta.

CAPÍTULO 2. FORMATO DE DATOS SÍSMICOS, FUENTES GENERADORAS DE RUIDO Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

En este capítulo se analizan los componentes de un canal sismométrico y se explican los diferentes tipos de ruido que contaminan la señal registrada en una estación sismológica, desde el generado en el sensor hasta en los sistemas de adquisición y registro, incluyendo también los ruidos culturales y naturales de los emplazamientos donde estos instrumentos se instalan.

De igual forma, se hace un recuento de los formatos de datos sismológicos, con énfasis en los formatos digitales usados a nivel internacional, con el objetivo de facilitar la comprensión de los métodos de análisis que serán empleados posteriormente.

Finalmente, se detallan los principales métodos de análisis del ruido sísmico y los modelos de referencia que se usan para estos estudios, a fin de comparar los resultados de la investigación obtenidos con estos estándares.

2.1. Espectro de la señal sísmica

Los terremotos se producen, de manera aleatoria, en la corteza terrestre, fundamentalmente en las regiones asociadas a los grandes sistemas de fallas transcurrentes y zonas de subducción. Debido a la velocidad de las principales ondas que generan el sismo durante su tránsito por el interior del planeta y a los tiempos de arribo de estas a la estación sismológica en función de la distancia epicentral, así como de las dimensiones finitas de la Tierra, el rango dinámico y ancho de banda en frecuencia donde se manifiestan las señales sísmicas presentan algunas particularidades.

El rango dinámico de las ondas sísmicas, es decir, la diferencia entre la menor señal que se debe registrar (por encima del umbral de ruido) y la mayor, correspondiente a un terremoto fuerte cercano es muy grande, de alrededor de 200 dB [4], [28].

En cuanto a la banda de frecuencia, NMSOP, Havskov y Pazos entre otros plantean que el ancho de banda total oscila entre los 0.00001 Hz de las mareas terrestres y los 2000 Hz de la sismicidad asociada a actividades de minería, la tabla 2.1 y el Anexo A1 muestran el ancho de banda de las señales sísmicas asociadas a diferentes estudios [29], [30] y [31].

En este trabajo se escogió, como rango de frecuencia donde se analizarán las señales y en función del cual se mostrarán los principales resultados, el intervalo entre 0,008 Hz y 50 Hz. La selección de esta banda de frecuencia toma en consideración, como límite inferior, la frecuencia esquina de las funciones de transferencia de los instrumentos instalados en las estaciones cuyos niveles de ruido serán analizados, los cuales son sismómetros de banda ancha con frecuencias de corte iguales a 0,016 y 0,0083 Hz (períodos de 60 y 120 segundos respectivamente); mientras como límite superior, se acepta el valor de 100 Hz (0,01 segundos de período), pues las componentes espectrales de las señales generadas por sismos muy cercanos de gran energía, nunca exceden este valor [29].

Tabla 2.1 Rangos de frecuencia de las señales sísmicas [31]

Aplicación	Ancho de banda (Hz)
Eventos sísmicos asociados a minería	5 - 2000
Micro-sismicidad y sismicidad inducida (embalses)	1 - 100
Sismicidad local	0,2 - 80
Fuertes movimientos	0,0 - 100
Sismicidad regional	0,05 - 20
Absorción de ondas sísmicas con la frecuencia	0,02 - 30
Cálculos de energía en tele-sismos	0,01 - 10
Difracción y <u>scatering</u>	0,02 - 2
Estudios de procesos dinámicos	0,005 - 100
Propiedades de la corteza terrestre	0,02 - 1
Dispersión de ondas superficiales	0,03 - 0,2
Oscilaciones libres de la Tierra	0,0005 - 001
Mareas terrestres	0,00001- 0,0001

2.2. Canal de registro sísmico

Las señales de ruido utilizadas en este trabajo son registradas en cada emplazamiento, a través de canales de registro sísmico. Obviando algunas particularidades técnicas de los diferentes fabricantes, la estructura de un canal de registro típico se muestra en la figura 2.1:



Figura 2.1: Estructura de un canal de registro sísmico

En esencia, la señal es detectada por los sensores y digitalizada en un amplio rango dinámico, para luego ser enviada a la Estación Central de monitoreo de la actividad sísmica o grabada localmente en algún tipo de soporte digital. Los diferentes programas que se utilizan para el análisis de estos datos, primeramente realizan la recuperación de la señal original, mediante la deconvolución de la señal con las funciones de transferencia de los sensores utilizados y el digitalizador, para posteriormente aplicar los métodos de análisis que permiten obtener los parámetros energético-temporales de los terremotos y las funciones PSD y PDF del ruido sísmico.

De acuerdo a la tabla 2.1, es posible definir la banda de frecuencias efectiva donde se deben registrar las señales de interés sismológico y por tanto también donde se realizan los estudios de ruido. Para una red sismológica como la cubana, este rango se encuentra entre 0,008 Hz y 100 Hz (0,01 y 120 segundos).

Sin embargo, es prácticamente imposible cubrir con un solo instrumento todo este rango de frecuencias debido, entre otros factores, a la respuesta en frecuencia propia de los sensores, su sensibilidad y a sus limitaciones mecánicas. La solución a este problema se logra mediante la división de los instrumentos, de acuerdo al ancho de banda efectivo en el cual pueden

registrar eficientemente las ondas sísmicas, en sismómetros de corto período, con frecuencias de registro entre 1 Hz y 100 Hz, sismómetros de banda ancha, con respuesta en frecuencia plana desde 0,001 hasta 50 Hz [32] y los sensores de banda ultra-ancha que pueden registrar señales desde 0,0005 hasta 10 Hz [33].

En el caso del rango dinámico, la solución consiste en instalar instrumentos menos sensibles, como los acelerómetros, que son capaces de registrar señales procedentes de sismos fuertes evitando la saturación mecánica del dispositivo.

2.2.1. Sensores

Los sensores inerciales efectúan la medición del movimiento del terreno de forma indirecta, para aprovechar el principio de la inercia de un cuerpo, que tiende a mantener su estado inicial de reposo ante un movimiento externo, siempre y cuando haya aceleración.

Su comportamiento es similar al de un sistema Lineal Invariante en el Tiempo, Lineal Time Invariant (LTI) y puede ser descrito fundamentalmente en cuatro formas: mediante una ecuación lineal diferencial de segundo orden, a través de la transformada de Fourier, usando la respuesta compleja y por último mediante la respuesta a impulso. En el tratamiento de señales digitales estos sensores son descritos mediante métodos diferentes y se consideran como filtros de respuesta a impulso finita, Finite Impulse Response (FIR), cuyos desarrollos se pueden encontrar en los trabajos de Oppenheim y Schaffer, para análisis digital [34].

La forma común de analizar el comportamiento de los sismómetros es a través del análisis de un sensor mecánico típico del tipo masa-resorte con transductor electromagnético [35]. Si se supone al sistema como inercial, el esquema básico está formado por un péndulo vertical compuesto por una carcasa, relativamente fija al terreno de la cual pende, mediante un resorte k , una masa M , como se muestra en la figura 2.2.

La ecuación de las fuerzas que definen el comportamiento de este sistema físico es:

$$-M \frac{d^2 U_m}{dt^2} - D \frac{dX_r}{dt} - kX_r(t) = 0 \quad (2-1)$$

Donde M es la masa del péndulo, D el coeficiente de fricción y k es el coeficiente elástico del resorte.

Si se aplica al sistema una aceleración $U_g(t)$ y operando matemáticamente la ecuación 2-1, se obtiene la ecuación diferencial que rige el comportamiento de este tipo de sistema.

$$\frac{d^2 X_r}{dt^2} + \frac{D}{M} \frac{dX_r}{dt} + \frac{k}{M} X_r(t) = -\frac{d^2 U_g}{dt^2} \quad (2-2)$$

Para el caso de un sistema con amortiguamiento igual a cero, el sistema oscila a una frecuencia angular propia ω_0 , por la transferencia de energía de la masa a energía potencial del resorte, por tanto:

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (2-3)$$

En el caso de un coeficiente de amortiguamiento $\neq 0$, la relación entre la frecuencia de oscilaciones amortiguadas ω y ω_0 se puede determinar por la ecuación:

$$\omega = \sqrt{\frac{4M\frac{k}{M} - (\varepsilon)^2}{4M^2}} = \sqrt{\frac{\frac{k}{M}}{M} \left(1 - \frac{(\varepsilon)^2}{4M\frac{k}{M}}\right)} \quad (2-4)$$

Si se reescribe la ecuación 2-2 en función de los valores de ω_0 y del coeficiente de amortiguamiento ε , se obtiene la ecuación diferencial ordinaria de segundo orden en función del desplazamiento X_r , la frecuencia de oscilaciones libres del péndulo ω_0 y el factor de amortiguamiento ε :

$$\frac{d^2 X_r}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dX_r}{dt} + \omega_0^2 X_r(t) = -\frac{d^2 U_g}{dt^2} \quad (2-5)$$

2.2.1.1. Análisis en frecuencia

Excitando al sistema mostrado en la figura 2-2 y descrito matemáticamente por la ecuación anterior, para realizar su análisis mediante una señal exponencial compleja de tipo $U_g(t) =$

$A_i e^{j\omega t}$ a la cual corresponde una aceleración $\frac{d^2 U_g}{dt^2} = -\omega^2 A_i e^{j\omega t}$, la ecuación (2-5) se puede escribir como:

$$\frac{d^2 X_r}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dX_r}{dt} + \omega_0^2 X_r(t) = \omega^2 A_i e^{j\omega t} \quad (2-6)$$

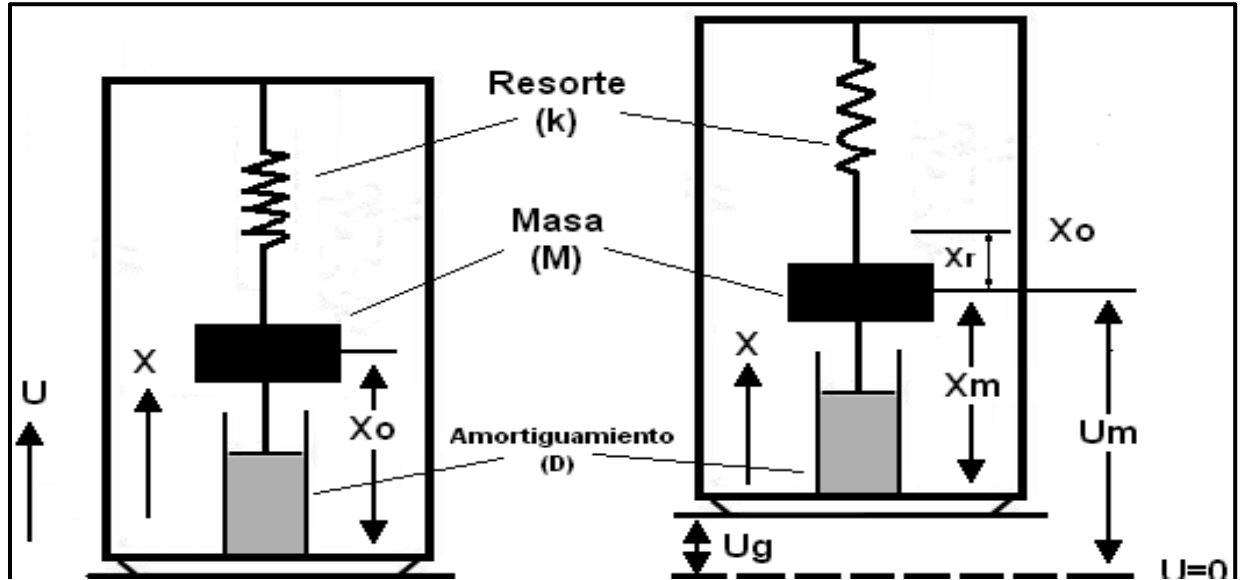


Figura 2.2: Esquema simplificado de un péndulo mecánico del tipo masa-resorte [35]

La solución en términos de los coeficientes A_i y A_o , que son elementos complejos, se obtiene de la forma:

$$-\omega^2 A_o + 2\varepsilon j\omega A_o + \omega_0^2 A_o = \omega^2 A_i \quad (2-7)$$

Despejando $\frac{A_o}{A_i}$ se tiene:

$$\frac{A_o}{A_i} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2\varepsilon j\omega} = T(j\omega) \quad (2-8)$$

Donde $T(j\omega)$ se define como la respuesta en frecuencia del sismómetro [36]. Según

Scherbaum, se considera que $\left| \frac{A_o}{A_i} \right| = \frac{|A_o|}{|A_i|}$, por lo que se escribe la respuesta en frecuencia

como:

$$|T(j\omega)| = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega^2}} \quad (2-9)$$

Y la fase:

$$\phi(\omega) = \arctan\left(\frac{I_m}{R_e}\right) = \arctan\left(\frac{-2\varepsilon\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \quad (2-10)$$

El anexo A2 muestra, de forma gráfica, los resultados de evaluar la ecuación (2-9) para diferentes valores de constante de amortiguamiento relativo. Aquí es necesario destacar que para el registro de señales sísmicas se selecciona un sistema al cual se le impone un coeficiente de amortiguamiento relativo de 0,707 con el objetivo de obtener una curva máximamente plana, donde el sistema alcance su estado estable en el menor tiempo posible. Por tanto se considera el sismómetro como un sistema de segundo orden sub-amortiguado, con un comportamiento similar a un filtro pasa alto, cuya frecuencia de corte inferior es igual a la frecuencia de oscilación del sistema [35].

2.2.2. Digitalizadores

La señal de salida del sensor sísmico es digitalizada mediante el uso de equipos de 24 bits de rango dinámico. Independientemente de la procedencia del equipamiento, la mayoría de estos están conformados por Procesadores Digitales de Señal, Digital Signal Processing (DSP) y en esencia contienen uno o dos bloques de amplificadores operacionales de instrumentación para la manipulación y adecuación de la señal, con el objetivo de cubrir todo el rango dinámico del convertidor A/D, y el convertidor propiamente dicho que está conformado por el par, modulador analógico Crystal CS5321 y el chip de filtro digital CS5322 que juntos funcionan como un ADC de alta resolución. La combinación CS5322/CS5321 realiza el muestreo, la conversión A/D y el filtrado anti-alias [37], [38].

Como norma, y teniendo en cuenta el rango de frecuencias de las señales sísmicas, es posible muestrear a 20, 40 y 100 Hz, para cumplir con el teorema de Nyquist – Shannon. En el caso de la red sísmica cubana, los canales de registro conformados por sismómetros se muestrean a 100 Hz, mientras que aquellos que usan acelerómetros, se muestrean a 200 Hz, debido a componentes espectrales de más alta frecuencia que se producen en caso de terremotos locales fuertes.

Otro aspecto a destacar es el efecto alias, debido al carácter periódico de la señal de muestreo, se produce un número infinito de respuestas a impulso, separadas por $\Delta t = 1/f_s$, donde f_s es la frecuencia de muestreo, trayendo como consecuencia que todas las señales con frecuencias por encima de la llamada frecuencia de Nyquist $f_n = f_s / 2$ se reflejan en el espectro de la señal registrada. La solución consiste en aplicar un filtro pasa-bajo con frecuencia de corte igual a $f_s / 2$.

De forma general se puede concluir expresando que, en el canal de registro sísmico, el par sensor-digitalizador funciona como un filtro pasa banda, cuyas frecuencias de corte están, definidas en baja frecuencia por el sensor a partir de su frecuencia de oscilaciones sub-amortiguadas y en alta frecuencia por la frecuencia de corte del filtro anti-alias empleado en el digitalizador, que a su vez depende de la frecuencia de muestreo.

Las funciones de transferencia de los elementos que componen el canal de registro sísmico se introducen en el programa PQLX mediante unos ficheros que las contienen en sus expresiones en polos y ceros, para deconvolucionarla con la señal afectada por la función de transferencia del canal y obtener la señal real medida, para poderla procesar.

2.3. Formatos de los datos sísmicos

Las investigaciones sismológicas dependen por completo de la cooperación internacional entre las instituciones que se dedican a su estudio debido a que, para lograr una alta eficiencia en la localización de eventos sísmicos y lograr, a largo plazo, estudios confiables de sismicidad y estructura del interior del planeta, es importante la acumulación de un gran volumen de datos de alta calidad con un formato estándar entre ellos y que permita su intercambio.

Durante casi un siglo, en la época de la instrumentación analógica y el registro en cintas fotográficas o papel, solo se intercambiaban las lecturas de los parámetros y los resultados principales del análisis de los sismogramas y rara vez los procedimientos para procesar, manejar, anotar y almacenar los registros originales.

El Formato Telegráfico (TF), tal como se documenta en el Manual de Práctica del Observatorio Sísmico [39], es un ejemplo de formato para reportar e intercambiar datos de parámetros de esa época, Anexo A3.

Instituciones internacionales como el Centro Nacional de Información sobre Terremotos del Servicio Geológico de los Estados Unidos, U.S. Geological Survey National Earthquake Information Center (NEIC) [40], el Centro Sismológico Internacional, International Seismological Centre (ISC) [41] o el Centro Sismológico Europeo, European Mediterranean Seismological Centre (EMSC) [42] han establecido y establecen los principales parámetros y formatos de intercambio de datos.

A partir de los estudios realizados por estas instituciones y, debido fundamentalmente al desarrollo tecnológico (e-mail e Internet), fueron propuestos diferentes formatos que sustituyeron el TF. Entre estos se pueden citar:

- GSE/IMS: Desarrollado por el Grupo de Expertos Científicos, Group of Scientific Experts (GSE) [43], organizados por la Conferencia de Naciones Unidas para el desarme, United Nations Conference on Disarmament [44] y con el objetivo de intercambiar datos, a nivel global, de las pruebas nucleares realizadas por las potencias nucleares, Anexo A4.
- ISF: Desarrollado por la Comisión de Observación e Interpretación Sismológica, Commission on Seismological Observation and Interpretation adjunta a la Asociación Internacional de Sismología y Física del interior de la Tierra, International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI) [45].

En todos los casos, los diferentes formatos deben cumplir con varios principios básicos entre los cuales están:

- Conciso: Debe evitar gastos innecesarios tanto en la transmisión como en el almacenamiento.

- Completo: Debe contener toda la información necesaria para el uso eficaz de los datos.
- Transparente: Deben ser de fácil lectura aún si no tiene la documentación completa.
- Sencillo: Debe ser de fácil análisis por programas informáticos de tratamiento de señales.

2.3.1. Formatos digitales

Las formas de onda digitales constituyen el mayor volumen de datos sísmicos almacenados e intercambiados a nivel internacional por las instituciones de investigación en sismología.

Debido a la amplia disponibilidad de equipos digitales de registro continuo y usando las tecnologías de comunicación modernas para la transferencia mundial de datos sísmicos (tiempo real, protocolos TCP/IP), su uso ha ganado enorme importancia en la actualidad.

Actualmente, los formatos usados por las redes sísmicas se pueden dividir en cinco grupos:

1. Formatos locales en uso en estaciones individuales, redes o utilizados por un equipo de registro sísmico en particular.
2. Formatos usados en programas de análisis estándar.
3. Formatos diseñados para el intercambio y archivo de datos.
4. Formatos diseñados para sistemas de bases de datos.
5. Formatos para la transmisión de datos en tiempo real.

El orden jerárquico del uso de estos formatos apunta a una conversión de los formatos de los contenidos en el grupo número 1 hasta el grupo número 5, es decir se puede tener un sistema digital de adquisición de datos de un fabricante específico que posee su propio formato de datos, pero usualmente estos formatos no son estándar y deben ser convertidos para cada uso, de acuerdo al orden que se presenta en los grupos subsiguientes.

2.3.2. Formatos SEED y Miniseed

Actualmente el formato estándar para el intercambio de datos es el formato SEED, Standard for the Exchange of Earthquake Data (SEED). Este formato fue desarrollado para la Federación Internacional de Redes Sismográficas Digitales, The International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN) [46], por NEIC y el Laboratorio Sísmico de Albuquerque, Albuquerque Seismic Laboratory (ASL) [47]. El objetivo principal fue el intercambio primario de formas de onda sin procesar. El formato SEED fue adoptado como estándar por la FDSN en 1987 y por IRIS DMC [48].

La tabla 2.2 muestra algunos de los formatos digitales más usados en la actualidad.

Tabla 2.2: Principales formatos de datos empleados en Sismología [26]

Formato de datos	Grupo jerárquico	Características
AH	2	Usado en el paquete de análisis de datos sísmicos desarrollado por <u>AH Lamont Doherty Geological Observatory, N.Y., USA</u>
CSS	2 y 4	Desarrollado por “ <u>The Center for Seismic Studies (CSS) Database Management System (DBMS)</u> ”
GeoSig	1	Formato binario usado por el fabricante GEOSIG
Guralp	1	Formato binario usado por el fabricante GURALP
ESSTF binary	1	Desarrollado por la “ <u>European Standard Seismic Tape Format (ESSTF)</u> ”
GSE	3	Propuestopor el “ <u>Group of Scientific Experts (GSE format)</u> ”
IRIS dial-up expanded ASCII	1	Desarrollado por IRIS para las estaciones IRIS que funcionan por discado y encuesta
ISAM-PITSA	2 y 4	Desarrollado para el paquete de análisis de datos sísmicos PITSA
Ismes	1	Formato usado por el fabricante Ismes
Kinometrics	1	Formato usado por el fabricante Kinometrics
Lennartz	1	Formato usado por el fabricante Lennartz Electronics
Nanometrics	1	Formato usado por el fabricante Nanometrics
SAC	2	Usado en el paquete de análisis de datos sísmicos SAC
SEED	3	Desarrollado por FDSN (IRIS)
Miniseed	3 y 5	Desarrollado por FDSN (IRIS)
Earthworm	5	Desarrollado para intercambio de datos
SEISAN	2	Usado en el paquete de análisis de datos sísmicos SEISAN

2.3.2.1. SEED

El formato SEED es un formato de datos destinado principalmente para el almacenamiento e intercambio de datos de series temporales y los metadatos relacionados procedentes de las estaciones sismológicas.

El llamado volumen completo SEED, full SEED volume es la combinación de valores de series temporales junto con sus metadatos. Esencialmente un volumen SEED es la combinación de un formato miniSEED con un volumen referido a las coordenadas de la estación y la respuesta instrumental de los equipos de adquisición.

Los volúmenes SEED no están diseñados para el procesamiento de datos, comúnmente se convierten a otros formatos, por ejemplo: el software rdseed de IRIS DMC puede convertir volúmenes full SEED a diferentes formatos de salida.

Nomenclatura de identificación de los datos

El formato SEED utiliza 4 campos del encabezamiento para identificar una serie temporal y definir las características de los paquetes de datos:

- Código de red, Network Code: Un código de uno o dos caracteres que identifica la red de procedencia de los datos. Estos códigos son asignados por la FDSN para brindar unicidad a los datos sísmológicos.
- Código de estación, Station Code: de uno a 5 caracteres para identificar la estación que registra los datos.
- Identificación de locación, Location ID: Un código de dos caracteres usado para identificar diferentes cadenas de datos en una sola estación. Estos identificadores son comúnmente usados para separar de manera lógica múltiples instrumentos o un conjunto de sensores en una sola estación.
- Código de canales, Channel Code: Es una combinación de 3 caracteres utilizados para identificar:
 - La banda de frecuencia y la frecuencia de muestreo.
 - El tipo de instrumento.
 - La orientación del sensor.

2.3.2.2. MiniSEED

El formato miniSEED es un subconjunto estándar de SEED que es usado para intercambio solamente de series de tiempo. Un fichero o trama miniSEED es una concatenación simple del registro de la serie temporal y por tanto más fácil de transmitir por las diferentes vías y protocolos existentes.

Este formato se complementa con el llamado volumen dataless SEED, que es la contraparte de metadatos para miniSEED y que contiene las coordenadas geográficas y la información de la respuesta del instrumento, usados a menudo para procesar los datos de las series temporales.

Los volúmenes o ficheros dataless pueden contener una historia completa y detallada de los metadatos de una o varias redes y estaciones y se utilizan comúnmente para poblar una base de datos de metadatos o en combinación con los ficheros miniSEED para convertir series de tiempo a un formato alternativo (por ejemplo utilizando el programa rdseed de IRIS DMC).

2.4. Fuentes generadoras de ruido sísmico

El ruido sísmico, como otros tipos de ruido explicados anteriormente, se genera a partir de fuentes externas e internas que influyen indistintamente sobre rangos de frecuencia específicos de la señal.

Son el resultado de la sumatoria de varias señales originadas por fuentes diversas y que se manifiestan en el registro de las señales sísmicas, en alta frecuencia predominantemente a partir de las componentes del ruido cultural y el viento, y en media y baja frecuencia por las señales de ruido que aparecen debido a efectos atmosféricos y ondas oceánicas [26].

Además de estas fuentes de ruido, también afectan la señal los ruidos de tipo interno. Estos están asociados a los equipos o sensores que detectan la señal sísmica, aunque por lo general el fabricante de estos instrumentos, garantiza que los mismos tengan un nivel muy bajo de

ruido propio en la banda de frecuencia de trabajo, de modo que no afecte significativamente a la señal medida.

Fuentes externas

- Ruido causado por el viento

Originados por las turbulencias ocasionadas por el viento, debido a las irregularidades topográficas y el correspondiente movimiento que provoca en los árboles, que se transmite a la tierra a través de sus raíces. Se considera fuentes de ruido de alta frecuencia, aunque también los objetos que son balanceados por el viento, como grandes torres y mástiles, generan ruido de baja frecuencia que también afecta el registro sísmico. Se encuentra en un rango que comprende los 0.5 Hz hasta aproximadamente entre los 15 Hz y 60 Hz [49].

Las estructuras donde están instalados los equipos sísmicos pueden provocar ruido sísmico debido a la acción del viento sobre las mismas. Por eso la mayoría de las estaciones sismológicas modernas se instalan en bóvedas debajo del suelo. Además las antenas, mástiles y otras construcciones se sitúan apartados de la bóveda para evitar la acción de estos sobre la misma.

- Ruido generado por el océano

Este tipo de ruido está presente en cualquier parte del mundo, aunque en el interior de los continentes se evidencia menos que en las regiones costeras, y es conocido como ruido microsísmico. Los microsismos oceánicos de período largo son generados en aguas superficiales o poco profundas en regiones costeras, donde la energía de la onda es convertida directamente en energía sísmica ya sea a través de variaciones de la presión vertical o rompiendo en las costas. Tienen un período aproximadamente de 10 s a 16 s, igual que las ondas del agua [50].

Los microsismos de período corto son generados por la superposición de ondas oceánicas de igual período que viajan en dirección opuesta, generando ondas

estacionarias con un período que resulta ser la mitad del original [50]. Estas ondas causan perturbaciones las cuales se propagan sin atenuación al fondo del océano.

Estos microsismos de alta frecuencia tienen mayor amplitud que los de baja frecuencia y el rango del período en que se encuentran ambos puede variar de una región a otra, pero están generalmente entre un segundo y 20 segundos [6].

Otras fuentes de ruido son las corrientes de agua o gas, en cascadas, presas, ríos, y tuberías. También los temblores relacionados con la actividad volcánica, que originan un ruido asociado al movimiento de fluidos y que pueden durar horas o días.

- Ruido causado por mala selección y construcción del emplazamiento de la estación

El nivel de ruido sísmico también varía en dependencia de las características del sitio (condiciones geológicas) donde está instalada la estación. En un sitio con buena relación señal a ruido, Signal to Noise Ratio, (SNR), se puede detectar más terremotos que en un sitio ruidoso teniendo en cuenta lo planteado en la teoría de detección de señales [51]. Basado en la experiencia que existe a nivel mundial sobre la instalación de sensores sísmicos, los emplazamientos ubicados en zonas continentales lejos de la costa son menos ruidosos que aquellos que se encuentran en islas o cerca de la costa [52].

El nivel de ruido en una estación sísmica depende de las condiciones geológicas y además de la proximidad a ella de diversas fuentes de ruido. Un sensor instalado en roca sólida debe ser menos sensible a ruidos locales, al contrario si el sitio se encuentra en una capa fina de sedimentos suave, ya que este será ruidoso incluso en la ausencia de fuentes identificables. Como regla la distancia entre una fuente potencial de ruido debería ser mucho mayor que la delgadez de la capa de sedimento [26].

- Ruido causado por el hombre

Es comúnmente conocido como ruido cultural. Se origina por el tráfico automovilístico, maquinarias y toda actividad realizada por el hombre. Es ruido de alta

frecuencia ($> 2 - 4$ Hz) por lo que se atenúa cuanto más lejos esté la fuente que lo origina. Se propaga fundamentalmente como ondas de superficie y disminuye su amplitud rápidamente con la distancia y la profundidad, por lo que para reducir su efecto sobre la señal sísmica, es mejor realizar el montaje de la estación en emplazamientos de pozo. Este tipo de ruido por lo general tiene grandes variaciones entre el día y la noche y puede tener frecuencias características en dependencia de la fuente que lo genera.

Fuentes internas

- Ruido propio del sensor y del sistema de registro

Un tipo de ruido muy importante a tener en cuenta debido a su inevitable presencia en un sensor sísmico, es el ruido instrumental, que puede tener fuentes mecánicas o electrónicas. Además también se debe considerar el ruido provocado por el sistema de registro [53], [54].

Todos los componentes electrónicos que forman parte de cualquier equipo empleado para la detección de terremotos, incluso el mismo sensor son fuentes generadoras de ruido. Los sismógrafos modernos están compuestos por amplificadores los que al igual que los componentes disipadores de potencia provocan ruido electrónico (ruido en los semiconductores). Los transductores electromagnéticos también producen ruido electrónico térmico (ruido en las resistencias). Tanto el ruido en los semiconductores como el ruido en las resistencias pueden limitar la sensibilidad del sistema [18]. El movimiento browniano de la masa sísmica también es una fuente continua de ruido y puede ser considerable cuando la masa es muy pequeña. Actualmente los sismómetros tienen suficiente masa como para que el ruido browniano sea despreciable contra el ruido electrónico [19].

La mayoría de los sismómetros producen en la señal disturbios transitorios espontáneos, causado por estrés en los componentes mecánicos. Estos pueden

desaparecer en meses o años, si esto no ocurre, pudiera ser producto a la corrosión debido a su trabajo en condiciones de clima tropical con altos índices de humedad y temperaturas elevadas.

Normalmente el ruido instrumental está por debajo del ruido sísmico causado ya sea por fuentes naturales o antropogénicas. De cualquier modo los fabricantes de equipos sismológicos, garantizan que el ruido en los instrumentos esté por debajo del modelo New Low Noise Model (NLNM) creado por Peterson (Anexo A5). En las hojas de datos de algunos equipamientos, se incluye la comparación de la curvas de ruido del instrumento con el modelo NLNM para todo el ancho de banda de trabajo, [55]. Cabe destacar que la mayoría de los sensores tienen algunas rangos de frecuencia donde el ruido instrumental es significativo, ejemplo de esto son los acelerómetros en baja frecuencia.

2.5. Modelos de ruido

El estudio del ruido sísmico y la caracterización de sus principales fuentes han sido abordados en la literatura científica por varios autores, a partir de los desarrollos tecnológicos y cambios en el equipamiento de registro sísmico.

Si en la década del 50 del siglo pasado el instrumental instalado en las estaciones sismológicas era en su totalidad de tecnología analógica y no se contaba con medios de cómputo, a partir de los años 80 comenzaron a sustituirse los sistemas de registro fotográficos por sistemas de adquisición de datos digitales, por lo que los métodos de estimación de ruido cambiaron de manera radical.

2.5.1. Modelos basados en mediciones de amplitud (instrumentación analógica)

Los primeros trabajos reportados, como los del Brune y Oliver en 1959, Frantti en 1962 y Kanai y Tanaka en 1966 permitieron, en su momento y a partir de sistemas de registro analógicos, lograr una mejor comprensión de este fenómeno. En esta dirección se señalan los primeros modelos de ruido publicados por Brune y Oliver en 1959 y Frantti en 1962 (Anexo

A6), donde las curvas obtenidas representan valores de desplazamiento de la señal de ruido (amplitudes máximas) en diferentes intervalos de tiempo para entornos rurales [56], [57] y los trabajos de Kanai y Tanaka en 1966 para ambientes urbanos, en dependencia del tipo de basamento [58], [59] (Anexo A7).

Debido a las propias limitaciones tecnológicas de la época y de la existencia de sistemas de registros fotográficos así como de papel y tinta, las metodologías presentadas por estos autores estuvieron orientadas a representar en curvas los valores de amplitud de la señal del ruido, medidos directamente en los sismogramas, en el dominio del tiempo [26].

Usualmente la señal original de ruido era filtrada y dividida en varios canales de registro, cada uno acotado en un rango de frecuencia y/o período, y luego se medían las correspondientes amplitudes para al final ser graficadas.

Como consecuencia de estas y otras investigaciones, en 1979, Willmore publicó el Manual Práctico de Observatorios Sismológicos (Manual of Seismological Observatory Practice, MSOP), donde se resumían los resultados de estos trabajos y se mostró una tabla donde se recomendaban distancias mínimas, desde las principales fuentes de ruido sísmico y en diferentes tipos de suelo, hasta las estaciones sismológicas (Anexo A8), teniendo en cuenta el equipamiento de la época y con el objetivo de minimizar el efecto del ruido [60].

2.5.2. Modelos basados en análisis espectral de señales digitales

A partir de la introducción de sensores de gran sensibilidad y rango de frecuencia expandido y sobre todo de la digitalización de las señales, comenzaron a realizarse procesamientos digitales del ruido y en ese sentido se presentaron nuevos modelos basados en el análisis espectral que dio como resultado la caracterización del ruido en frecuencia basado en las densidades espectrales de potencia (análisis espectral).

Esto, unido al aumento de las capacidades de los sistemas de cómputo permitió realizar un gran volumen de trabajo de cálculo con series temporales de larga duración que sirvieron para estimar los valores del ruido a nivel global.

Modelos basados en la determinación de las PSD (Peterson)

Peterson comenzó a publicar sus resultados en 1980 y los actualizó y modificó en 1993, estos son conocidos en la literatura como, New High Noise Model (NHNM) y New Low Noise Model (NLNM), modelos de alto y bajo nivel de ruido. Son curvas que representan el límite más alto y más bajo para el nivel de ruido que se puede tener como referencia en una estación sismológica. Están basados en el cálculo de la función PSD del ruido en 75 estaciones sismológicas digitales distribuidas por todo el mundo. Para la obtención de estos nuevos modelos de ruido, Peterson utilizó el mismo procedimiento que ya había empleado en los modelos de ruido originales creados por él en 1980 [6]. En la figura 2.3 se muestra una comparación entre los modelos originales y los actuales, publicados por este autor.

Estos gráficos, llamados curvas de Peterson, establecen los límites que se aceptan, de forma consensuada por la comunidad científica sismológica, como referencia a tener en cuenta en la evaluación de las posibles fuentes de ruido, lo que permite junto con otros parámetros, la selección del emplazamiento donde se desea instalar una estación sismológica, empleándose también para el diseño y construcción de los sensores sísmicos y digitalizadores.

Una interpretación primaria de este modelo permite identificar una zona en el gráfico acotada entre los -90 dB y -180 dB (valores de PSD en decibeles), que representa en que rango debe estar el espectro de ruido de una estación sismológica prototipo, que incluye todas las fuentes de ruido explicadas anteriormente, para considerarla como una estación útil en la detección de sismos.

Sin embargo, estos espectros de ruido varían entre los registros horizontales y verticales de una estación sismológica y dependen de múltiples factores que tampoco son uniformes en el tiempo ni en la frecuencia.

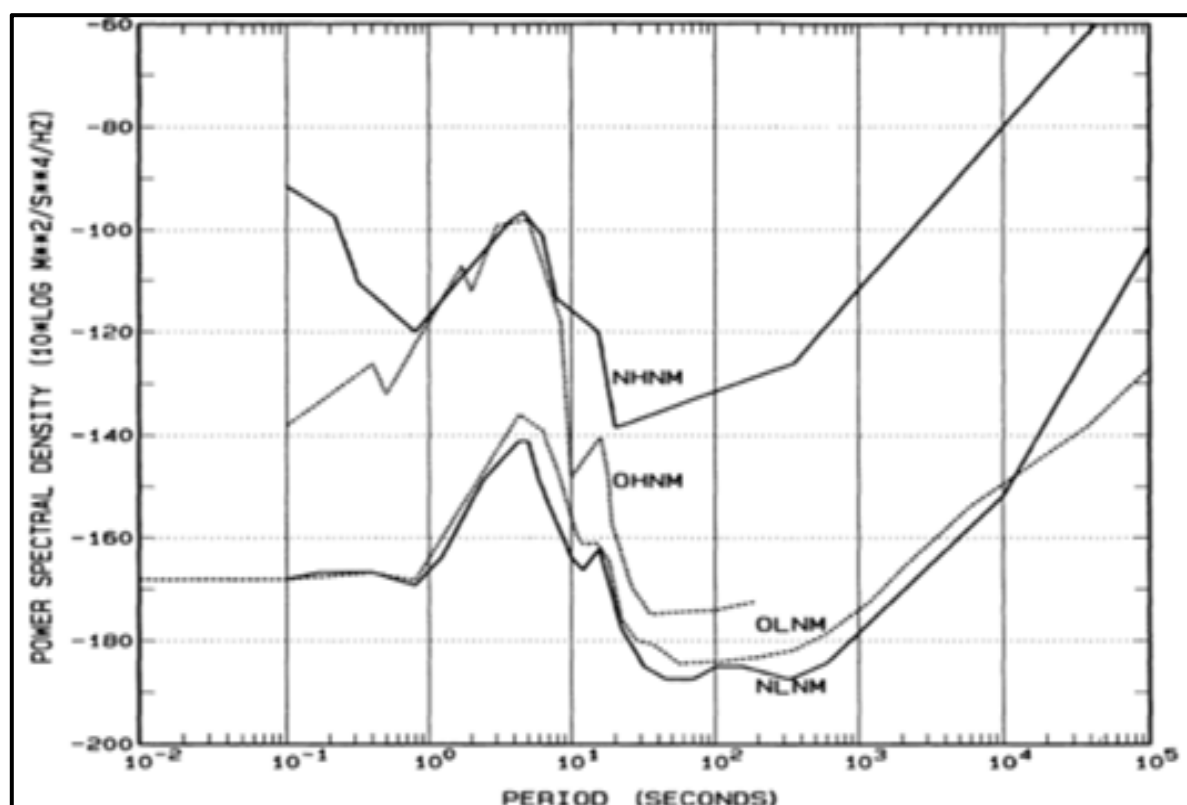


Figura 2.3: Comparación entre los modelos originales de ruido de Peterson y los NLNM y NHNM, [6]

A períodos cortos (< 2 s), un nivel de ruido que esté dentro de un factor de 10 sobre el NLNM, puede ser considerado muy bueno en algunas áreas. El ruido de corto período en la mayoría de los sitios es debido a la acción de hombre y en cierto modo, algo mayor en las componentes horizontales que en la vertical.

En períodos intermedios predominan los ruidos por microsismos que tienen amplitudes similares tanto en las componentes horizontales como en la vertical y tiene gran influencia de las variaciones de las estaciones del año. En invierno, en algunas regiones este puede estar 50 dB por encima del NLNM.

En períodos largos, el ruido en la componente vertical está a menudo entre 10 dB y 20 dB por encima del NLNM. En las componentes horizontales puede existir debido a la inclinación (tilt), y ser mayor que en la componente vertical en un factor de hasta 300 veces, incrementándose con el período.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se acepta que un sitio puede ser considerado como favorable cuando el ruido en las componentes horizontales en un período de 100 s a 300 s está dentro de 20 dB (un factor de 10 en amplitud) por encima del ruido de la componente vertical.

Modelos basados en la determinación de las PDF (McNamara y Buland)

En fecha más reciente, específicamente en 2004, McNamara y Buland desarrollaron un nuevo enfoque para evaluar el ruido en las redes sismológicas, basado en el análisis estadístico del ruido, teniendo en cuenta el cálculo de la función PDF de las PSD de las señales de ruido sísmico. Estas PSD se determinan con el mismo algoritmo que empleó Peterson para generar sus nuevos modelos de ruido. En la figura 2.4 se muestran los resultados para el registro de la componente vertical de una estación sismológica de la red mundial.

Para este estudio se emplearon varias señales digitales de estaciones sismológicas en Estados Unidos, pertenecientes a la (USNSN) y el (ANSS). Estas señales fueron tomadas en un período de 3 años y el estudio tuvo como objetivo caracterizar el desempeño de las estaciones de banda ancha en Estados Unidos y detectar problemas de funcionamiento de las mismas [61].

Este enfoque ha sido exitoso por lo que se ha convertido en el estándar para el estudio de ruido en varias redes sísmicas en el mundo entero. Muestra de esto son los trabajos de Custodio; Vasallo; Rastin y Castellaro, a diferencia de la red del Servicio Sismológico Nacional de Cuba donde aún no se ha hecho ningún estudio de este tipo. [62], [63], [64], [65].

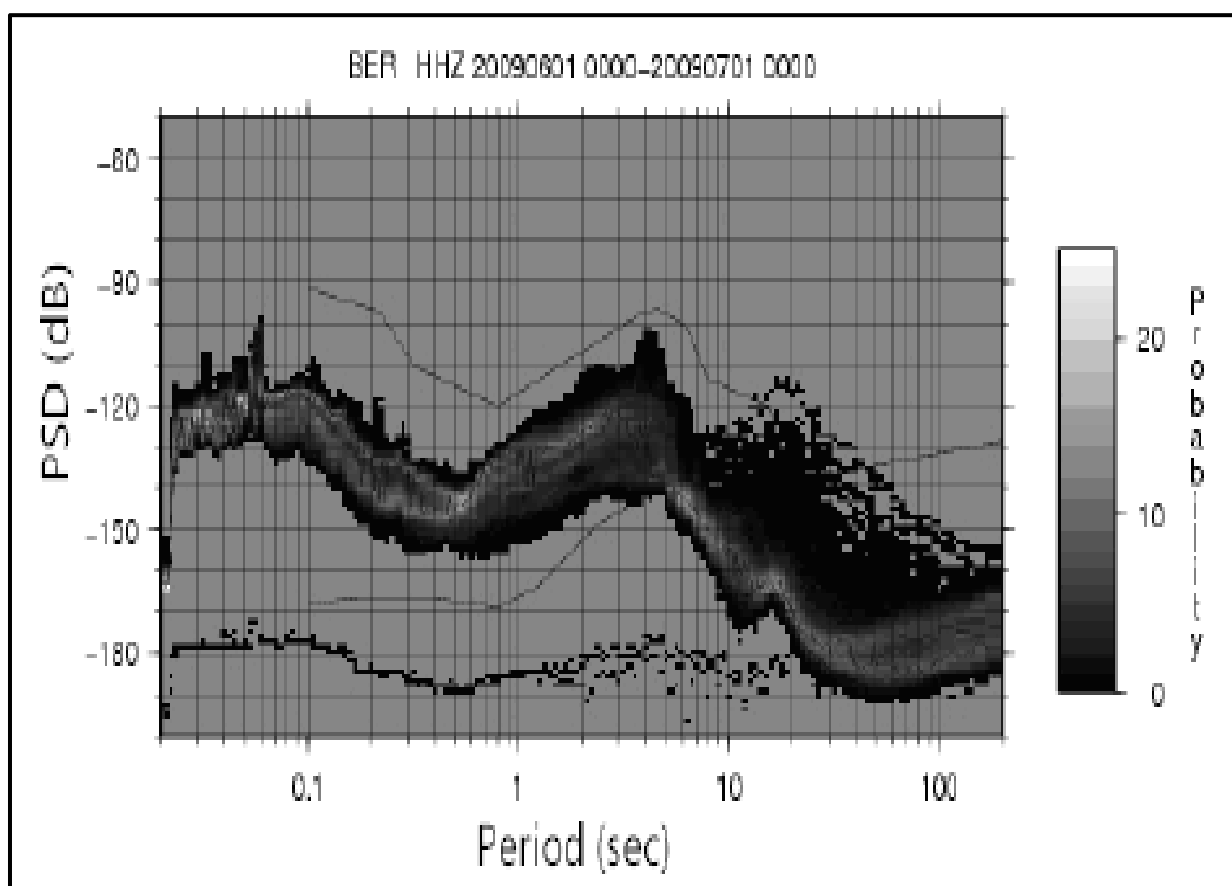


Figura 2.4: Curvas resultantes de los modelos de PDF, correspondientes al registro de la componente vertical [61]

2.6. Influencia del ruido, relación señal-ruido (SNR) y métodos de filtrado y reducción

Debido a sus características, la influencia de las señales de ruido no puede ser eliminada totalmente de las señales a las cuales afectan, por lo que son un problema con el que muchos ingenieros e investigadores tienen que lidiar para garantizar la buena calidad del dato útil. No obstante, el ruido puede ser atenuado y así garantizar una buena relación señal a ruido. Las técnicas de filtrado es uno de los métodos más utilizado en sismología para lograr disminuir la presencia del ruido. Para esto, un buen entendimiento de cuanto difiere la señal útil del ruido es necesario, ya que el filtrado puede mejorar la SNR cuando la diferencia entre el espectro de la señal y el espectro del ruido es significativa. En la figura 2.5 se muestra como en una señal es filtrado el ruido para una banda de frecuencia específica.

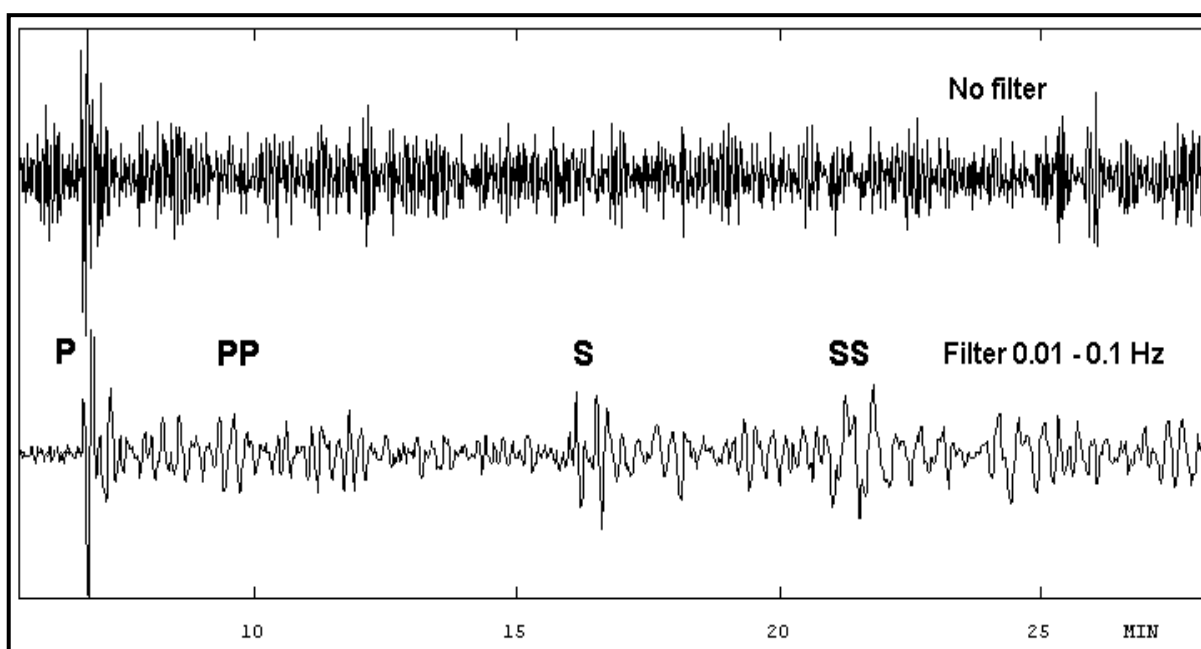


Figura 2.5: Señal sin filtrar y la misma señal filtrada. En esta última se puede apreciar la mejora de la SNR y por ende una mejor observación de algunas de las fases de la señal [26]

En el caso de que la frecuencia del ruido coincida con la frecuencia característica de la señal, entonces, el filtrado no mejorara la SNR. Por otra parte, si se realiza un arreglo de sensores sísmicos (cuando el diámetro del grupo de sensores está dentro del radio de correlación de la señal), entonces conociendo la dirección y la velocidad de propagación de la señal, se puede compensar la diferencia de llegada de las señales de cada sensor y luego sumarlas. Esto aumenta la amplitud de la señal por la cantidad de trazas empleadas, y disminuye el ruido en la raíz cuadrada de esta misma cantidad, aumentando también en este factor la SNR. En la figura 2.6 se observan las señales de salida de los sensores que componen el arreglo, en los que no es visible, debido al ruido, ninguna señal. En la primera traza se observa la señal suma con una mejora en la SNR.

También se realiza la atenuación del ruido mediante la predicción del mismo. Como es posible determinar las características del ruido basado en la correlación y la auto-correlación de las salidas de los sensores de un arreglo sísmico, entonces esto permitiría la predicción del ruido esperado en un intervalo de tiempo, lo que permite extraerlo de la señal de dato, mejorando la SNR.

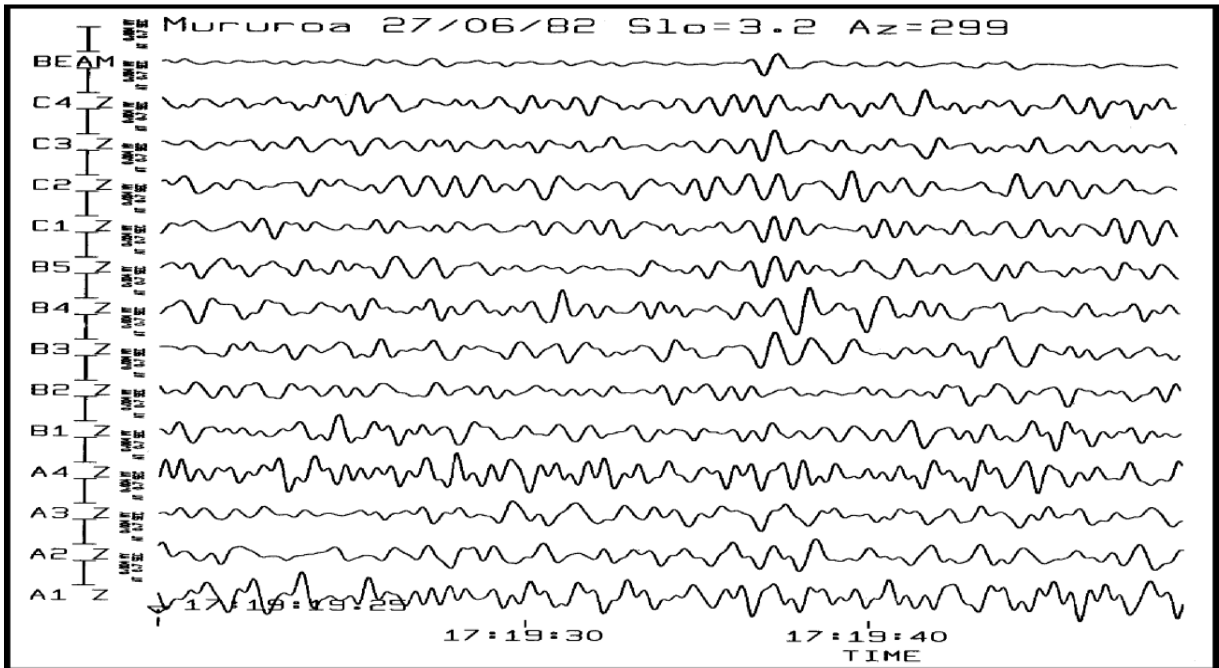


Figura 2.6: Detección de una explosión nuclear débil bajo suelo por un arreglo de 13 sensores en Alemania [26]

Como se ha mencionado anteriormente, el ruido en alta frecuencia también puede ser atenuado significativamente al instalar los sensores en emplazamientos de pozos. Aunque debido a las condiciones geológicas y a las particularidades del ruido local, no necesariamente la SNR mejora con la profundidad. De cualquier modo dentro de unos pocos cientos de metros de profundidad, se espera una mejora considerable de la relación señal a ruido, principalmente en sensores de banda ancha que son más sensibles a cambios de temperatura y a los cambios por inclinación (tilt).

2.7. El paquete de programas PQLX

El PQLX (IRIS-PASSCAL Quick Look eXtended) es una herramienta para el procesamiento de datos sismológicos que permite caracterizar y evaluar el desempeño de una estación sísmica. Está basado en el cálculo de la PDF de las señales de ruido, usando la distribución de la PSD. Las densidades espectrales de potencia son almacenadas en una base de datos MySQL (My Structured Query Language) lo que permite que los usuarios puedan acceder a través de una interfaz de usuario a una serie periódica específica de las PSD.

La característica fundamental de este programa, es que para realizar el procesamiento de las señales no es necesario eliminar los datos con terremotos, sistemas transitorios, fallos del sistema y otros, como normalmente se venía haciendo en los análisis de ruido. Estos son graficados con respecto a un nivel de probabilidades, mostrando baja probabilidad de ocurrencia, mientras que el ruido sísmico presenta una alta probabilidad de ocurrencia. Además examinar estos eventos relacionados con el funcionamiento de la estación y el ruido cultural irregular, permite estimar la calidad de la estación y el nivel de ruido de la misma [66].

El PQLX es una herramienta de gran importancia para caracterizar el desempeño de las estaciones, determinar la selección de emplazamientos para futuras instalaciones, evaluar el nivel de ruido sísmico, determinar las fuentes que lo generan, detectar problemas con los sensores y los sistemas de adquisición y para evaluar la calidad del dato sísmico en general.

Los formatos de datos sísmicos que maneja el sistema son Raw Reftek (RT100), mini-SEED, AH, SEGY, SAC, DR100 y NANO. Todos los datos son procesados con toda la información del encabezado.

Posee además, como parte del paquete que lo conforma, el programa PQL (IRIS-PASSCAL Quick Look) que permite realizar un tratamiento preliminar de las señales antes de proceder a la determinación de las PSD y PDF, por ejemplo es posible visualizar la traza entera de la señal, realizar corrección de offset, centrado de la señal, filtrado y suavizado en diferentes bandas de frecuencia. De igual forma permite determinar los espectros de las señales, como se muestra en las figuras 2.7 y 2.8, y en los anexos A9 y A10.

2.7.1. Preprocesamiento y procesamiento de los datos:

Para el cálculo de las PSD se emplea el método utilizado por Peterson para realizar el NLNM, procesando series de tiempo de una hora de duración, superpuestas en un 50%. Este solapamiento de las series de tiempo se emplea para reducir la varianza de las PSD estimadas,

[67]. Como se mencionó anteriormente no se eliminan los datos que contengan terremotos, ni tampoco las tramas de señal con pérdidas, pulsos de calibración u otros. Además, la respuesta en frecuencia del instrumento se elimina con el objetivo de permitir que las señales estén en unidades físicas de aceleración del suelo, y de este modo poder hacer una mejor comparación con el NLNM de Peterson.

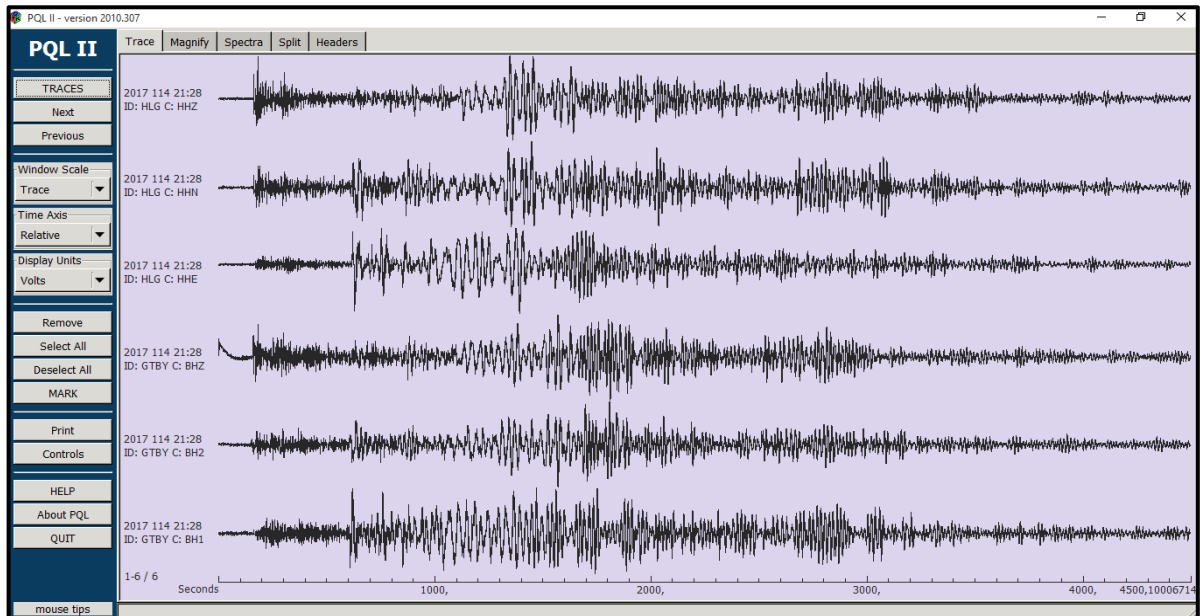


Figura 2.7: Ventana principal del programa PQL [66]

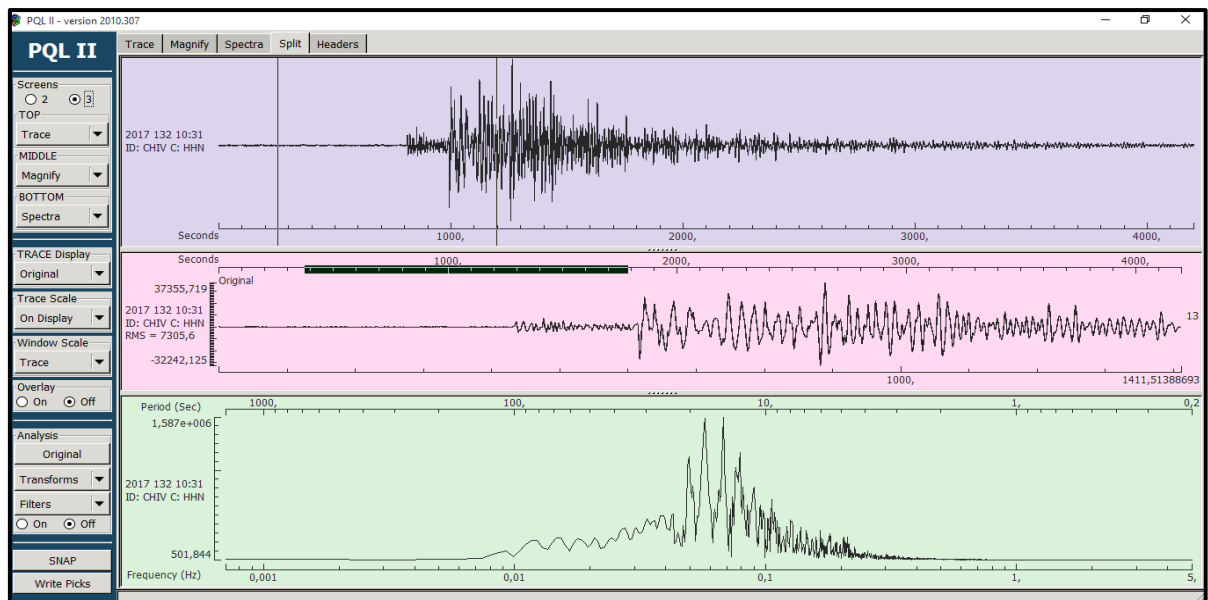


Figura 2.8: Ventanas auxiliares del programa PQL, de arriba hacia abajo, selección de una señal específica, amplificación de una parte de esta y cálculo del espectro del tramo seleccionado [66]

Como se explicó en el capítulo anterior, el uso de la función PSD es una herramienta muy importante en el estudio de las señales de ruido sísmico, al ser consideradas estas como procesos estocásticos estacionarios en sentido amplio (los valores de las estadísticas de primer orden media, varianza, y de segundo orden auto-correlación no varían en los dos primeros instantes de tiempo de la señal) y por tanto imposibles de ser analizados en frecuencia directamente a partir de Fourier.

Además el uso de las PSD permite, a través del teorema de Parseval (ecuación 1-16), obtener el valor de la amplitud cuadrática media del ruido en el dominio del tiempo para un ancho de banda específico, lo cual es equivalente a determinar cuantitativamente el valor del nivel de ruido en un rango de frecuencias.

Un paso muy necesario antes de realizar el procesamiento de las señales es la etapa de pre-procesamiento, que permite llevar el estado de las señales a las condiciones necesarias para el procesamiento. Para el pre-procesamiento de las PSD, a partir de la serie temporal horaria, primeramente se mejora la relación de velocidad de la Transformada Rápida de Fourier, Fast Fourier Transform (FFT), reduciendo la cantidad de operaciones truncando el número de muestras N en la serie de tiempo, lo que reduce la longitud de la serie. También con el objetivo de reducir la varianza de las PSD finales estimadas, cada serie de tiempo de una hora es dividida en 13 segmentos, superpuestos en un 75%, donde se reduce la longitud de los nuevos segmentos de series, también reduciéndose el número de muestras. Además con el objetivo de minimizar la contaminación de las señales de período largo, el dato es transformado a un valor medio igual a cero.

Si u_n son los valores de datos de la serie de tiempo $u(t)$, de longitud T y N muestras, el valor del dato medio se obtiene por:

$$U_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n \quad (2-11)$$

La tendencia de período largo T_{lp} , es cualquier componente de frecuencia cuyo período es mayor que la longitud del registro T_r y se define como:

$$T_{lp} = \alpha_u(t - \frac{T_r}{2}) \quad (2-12)$$

Para $0 \leq t \leq T$

Eliminando las tendencias se logra evitar distorsiones largas en el procesamiento espectral al eliminar la estimación de las cantidades espectrales de baja frecuencia.

Luego se suprime la fuga en los lóbulos laterales en la FFT resultante aplicando una función tapersinusoidal al 10% en los extremos de las series de tiempo. Esto suaviza la FFT y minimiza el efecto de la discontinuidad en las series de tiempo.

2.7.2. Densidad Espectral de Potencia:

El modo de determinar la distribución en potencia de la señal de ruido sísmico es a través del cálculo de la PSD. Para esto, como se expresó anteriormente, la PSD se define como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación de la señal de ruido. El método más común es el de la FFT [67], debido a su eficiencia computacional.

La transformada de Fourier de rango finito de una serie de tiempo periódica $y(t)$ está dada por:

$$Y(f, T) = \int_0^{T_r} y(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2-13)$$

Para valores de frecuencia discreta f_k las componentes de Fourier se definen como:

$$Y_k = \frac{Y(f_k, T)}{\Delta t} \quad (2-14)$$

Siendo $f_k = k/Nt$ para $k=1,2,\dots, N-1$

Teniendo en cuenta lo anterior la densidad espectral de potencia total estimada es:

$$P_k = \frac{2\Delta t}{N} |Y_k|^2 \quad (2-15)$$

Pudiéndose deducir que la potencia total P_k , es el espectro de amplitud al cuadrado multiplicado por un factor de normalización. El cálculo de la PSD se repite para cada uno de los 13 segmentos de tiempo y luego se promedia.

Las PSD estimadas son convertidas a valores en decibeles (dB) respecto a aceleración $(m/s^2)^2/Hz$ para compararlos con los modelos de ruido de Peterson, quedando:

$$P_k(dB) = 10 \log_{10} P_k \quad (2-16)$$

Función de Densidad de Probabilidades:

La PDF permite determinar la probabilidad de ocurrencia del ruido a una determinada frecuencia. Estas PDF se generan a partir de las PSD calculadas. Primero se muestrean las PSD tomando promedios de una octava en intervalos de 1/8 de octava. Esto reduce el número de frecuencias. La potencia se promedia entre dos frecuencias, con un período central T_c , que es el período medio dentro de la octava.

2.8. Conclusiones parciales

- Se comprobó que existen varios modelos que permiten comparar, en una estación determinada, los niveles de ruido propio existiendo técnicas para la disminución de este, en función del objetivo específico de cada red.
- Se corrobora que existen diferentes formatos en los que se pueden definir los datos sismológicos en dependencia de su uso y que el formato miniSEED es el estándar y el más empleado para el intercambio y almacenamiento de datos.
- Se ratifica que el programa PQLX, es una herramienta muy empleada para realizar los estudios de ruido sísmico, a través del cálculo de la PSD y la PDF de las señales de ruido. Además permite evaluar el desempeño de una estación sismológica.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL RUIDO SÍSMICO EN LA RED DE ESTACIONES DEL SSN CUBANO

En este capítulo se presenta el estudio de ruido correspondiente a las estaciones sismológicas de la red cubana, efectuado a través del uso de las técnicas de análisis espectral explicadas anteriormente.

Particularizando la investigación, se explica todo el proceso de selección de las señales sísmicas que serán objeto de estudio, a partir de la base de datos de señales del CENAIIS y su subdivisión por meses, estaciones del año, intervalos diurnos y nocturnos, entre otros.

Teniendo en cuenta los resultados del estudio de ruido realizado para las estaciones incluidas en la investigación, se analizan diferentes medidas de reducción del ruido valorando cuáles de estos pueden ser aplicados en la red sismológica cubana y cuáles de ellos no, en dependencia de las características de la red y de la disponibilidad económica, con el objetivo de mejorar la relación señal a ruido, que en general repercute de forma positiva en la calidad del dato sísmico.

3.1. La red sísmica cubana

El CENAIIS cuenta con una red de estaciones instaladas en todo el país, con especial énfasis en la zona oriental debido a su cercanía a la principal zona sismogeneradora [8], como se muestra en la figura 2.5. La red está compuesta por 20 estaciones que incluyen sismómetros de corto período y banda ancha, así como también acelerómetros para el registro de terremotos fuertes.

En la figura 3.1 se muestra la disposición geométrica de la red de estaciones y en la tabla 3.1, las coordenadas geográficas, la altura y los códigos de red y estación de las estaciones seleccionadas para la investigación que se presenta.

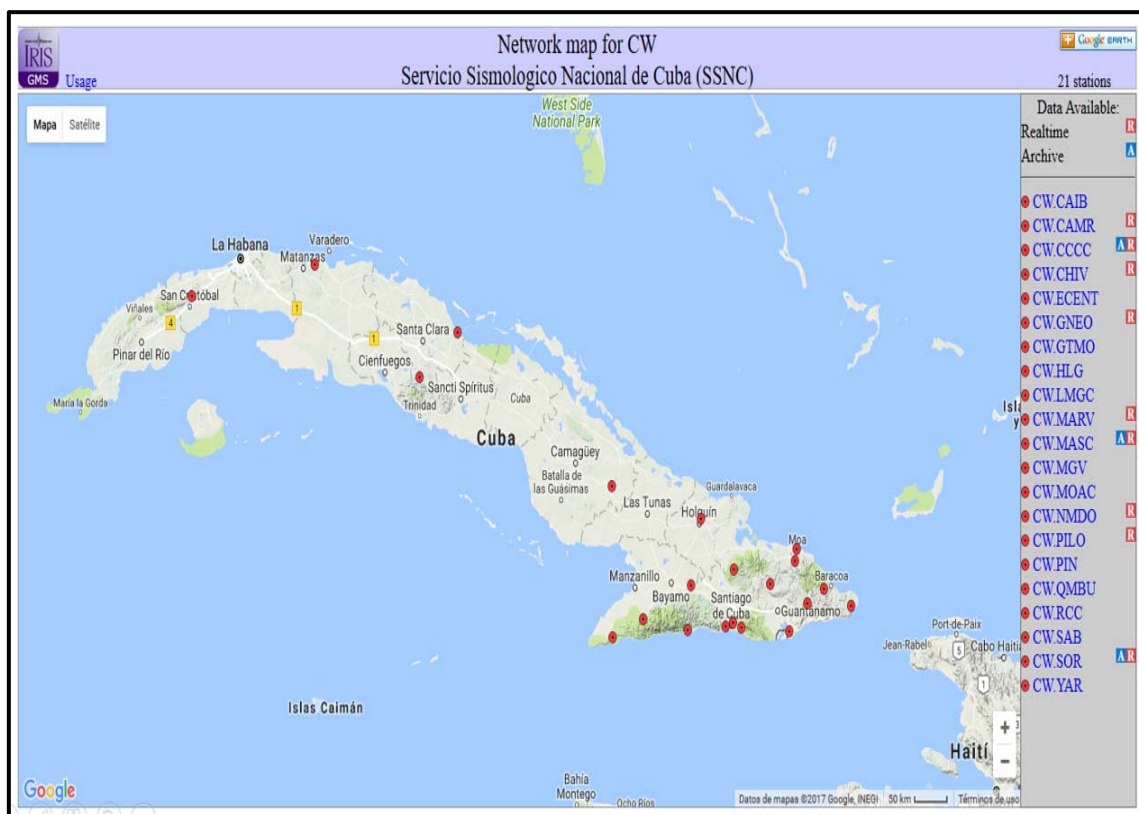


Figura 3.1: Mapa de la red de estaciones del SSN cubano [48]

Con el objetivo de garantizar la cobertura del ancho de banda y el rango dinámico de las señales sísmicas, las estaciones están dotadas de diferentes instrumentos. Las más cercanas al principal sistemas de fallas [68], que son Río Carpintero (RCC), Maisí (MASC) y Las Mercedes (LMGC) tienen instalados sismómetros de banda ancha (Geodevice BBVS, 60 s) y en paralelo acelerómetros (Geodevice BBAS-2, 2g) [69], mientras que el resto de las estaciones están equipadas con sensores de banda ancha (Nanometrics, Trillium 120P y Trillium Compact, 120 s). La adquisición de los datos en todos los casos se realiza a través de digitalizadores que contienen convertidores analógicos digitales $\Sigma - \Delta$ (mayormente mediante la combinación de los CI CS5322/CS5321 que representan moduladores digital y filtro respectivamente).

En el caso de las estaciones RCC, MASC y LMGC los datos se adquieren y digitalizan mediante el Geodevice, EDAS24IP, mientras que el resto de las estaciones consideradas en este trabajo tienen instalados los Nanometrics, Taurus y Centaur.

En todos los casos los datos se muestrean a 100 Hz, lo cual es suficiente teniendo en cuenta la frecuencia de las señales que se desea registrar.

Los datos se envían, en tiempo real, a la estación central del SNN a través de enlaces de datos ADSL, por fibra óptica, satelitales y GPRS, garantizándose un porcentaje alto de conectividad en todos los casos.

Tabla 3.1: Estaciones de la red sísmica del SSN seleccionadas para el estudio de ruido

Estación	Código	Código	Coordenadas		Elevación	Tipo de roca
	red	estación	Latitud (°)	Longitud (°)	(metros)	
Chivirico	CW	CHIV	19,97648	-76,415129	20	Ceniza volcánica formando capas o estratos
Río Carpintero	CW	RCC	19,995	-75,6965	128,4	Rocas ígneas muy duras
Mar Verde	CW	MARV	20,005285	-75,906555	100	Rocas ígneas (basaltos)
Holguín.	CW	HLG	20,920045	-76,236173	100	Rocas ígneas (serpentinitas)
Nuevo Mundo	CW	NMDO	20,559826	-74,982677	50	Rocas ígneas (serpentinitas)
Maisí	CW	MASC	20,1755	-74,2312	413,6	Rocas sedimentarias (calizas duras carsificadas)
Las Mercedes	CW	LMGC	20,0646	-77,0045	162	Ceniza volcánica formando estratos
Pilón	CW	PILO	19,91395	-77,408806	472	Ceniza volcánica formando estratos
Casorro	CW	CCCC	21,1934	-77,4173	89.6	Rocas ígneas muy duras (granodioritas)
Manicaragua	CW	MGV	22,1194	-79,9796	205,4	Rocas metamórficas con suelo intemperizado
Camarioca	CW	CAMR	23,061738	-81,370859	57	Rocas sedimentarias
Soroa	CW	SOR	22,7932	-83,0086	100	Rocas sedimentarias

Los instrumentos en estas estaciones han sido instalados en emplazamientos de superficie (Anexo B1), cuartos de péndulos con un pedestal realizado en hormigón masivo (tipo de mezcla que no posee acero ni áridos de tamaño grande) y aislado física y estructuralmente del resto de la caseta. El objetivo de este tipo de construcción es minimizar la influencia de la estructura del cuarto de péndulos sobre los instrumentos y reducir los ruidos provocados por este concepto.

No se ha tenido especial cuidado en el aislamiento individual de los sensores frente a variables medioambientales como temperatura, humedad, protección electrostática y acústica entre otras. En este sentido hay que señalar que no se han seguido los procedimientos utilizados a nivel internacional para la instalación de este tipo de equipamiento y este se refleja, como se demuestra más adelante, en algunas de las estaciones.

3.2. Zona de estudio

La zona elegida para realizar los estudios de ruido y la posterior determinación del rango de detección de la red sísmica cubana está comprendida entre los 19,000000° y 22,000000° de latitud Norte y los - 73,000000° y - 78,000000° de longitud Oeste.

La justificación de esta selección está dada por varios elementos, en primer lugar esta área comprende las provincias del extremo oriental de Cuba (Guantánamo, Santiago de Cuba, Granma, Holguín, Tunas y parte de Camagüey) que son las provincias más cercanas a las principales fallas tectónicas del país, específicamente al sistema de fallas Bartlett-Cayman que tiene potencialidad para producir terremotos de gran magnitud (Anexo B2).

De igual forma, como se observa en el mapa mostrado en el anexo B3, la zona oriental de Cuba concentra la mayor cantidad de terremotos registrados por la red del SSN y además en ella han ocurrido la mayoría de los sismos históricos de los cuales se tienen referencias documentadas [70], [71] y [72].

Por último es importante señalar que en la zona de estudio están instaladas 16 de las veinte estaciones sismológicas que tributan datos al SSN, lo cual representa el 80% de las estaciones operativas [8] (Anexos B4 y B5).

3.3. Selección de los datos

Para seleccionar las series temporales que sirvieran como datos de entrada al paquete de programas PQLX, se analizaron los siguientes escenarios:

- Trazas correspondientes a la totalidad del año 2016 con el objetivo de determinar los niveles de ruido de cada estación durante todo el año.
- Señales relacionadas con las dos principales estaciones climáticas en Cuba, con el propósito de identificar la incidencia de los períodos de lluvia y seca en los niveles de ruido.

- Series temporales divididas en 12 horas correspondientes a cada estación incluida en el estudio, con el objetivo de analizar la influencia de los cambios puntuales causados por variaciones de temperatura y el ruido cultural.
- Trazas de las estaciones próximas a la trayectoria de eventos meteorológicos extremos como huracanes e intensas lluvias, con el objetivo de determinar la relación existente entre los cambios de presión atmosférica, aumento de precipitaciones y velocidad del viento.

Específicamente fueron escogidas, dentro de la zona de estudio explicada anteriormente, las trazas correspondientes a las estaciones de banda ancha Maisí (MASC), Río Carpintero (RCC), Las Mercedes (LMGC), Mar Verde (MARV), Holguín (HLG), Nuevo Mundo (NMDO), Chivirico (CHIV), Moa (MOAC) y Cascorro (CCCC).

Además, las series temporales de otras estaciones como Manicaragua (MGV), Camarioca (CAMR) y Soroa (SOR) fueron usadas en este trabajo para ejemplificar algunos efectos puntuales que inciden sobre el ruido, a partir de fenómenos meteorológicos, cambios de instrumentos, reinstalaciones del equipamiento y otros.

3.4. Resultados del análisis de las PSD y PDF

3.4.1. Comportamiento anual del ruido en las estaciones del SSN

Después de la selección de los datos de interés para la realización del estudio, se realizó el procesamiento de los mismos. Se obtuvieron las curvas de las PSD y las PDF de un año entero para cada una de las estaciones, con el programa PQLX descrito anteriormente. Todo esto con el objetivo de determinar los principales rangos de frecuencia en los que se evidencia

en mayor medida el ruido y su probabilidad de ocurrencia en el tiempo. Las PSD en color rosa presente en todos los gráficos, con baja probabilidad de ocurrencia como se indica en la escala, son resultado de eventos casuales como terremotos, fallos del sistema de adquisición, fallos de comunicación, entre otros.

La figura 3.2 muestra las curvas de PSD en las componentes verticales del año 2016, de 6 estaciones de la red del SSN, estas son RCC, NMDO, MOAC, MGTV, MASC, MARV. Como se muestra en la figura 3.2a, la estación RCC presenta un nivel de ruido con baja probabilidad en casi todo el período, excepto en el rango de un segundo a 10 s, donde la probabilidad de ocurrencia del ruido en todo el año, es notable en comparación con otros rangos de frecuencia y además está por encima de -140 dB. Esto puede estar influenciado por el ruido antropogénico presente en los alrededores donde se encuentra ubicada la estación. RCC está instalada cerca de la carretera a La Gran Piedra, en las cercanías habitan personas y además existe el cauce del Río Carpintero. Este accidente fluvial es básicamente un río estacional, con variaciones en el caudal de agua en dependencia de las estaciones de lluvia o seca, constituyendo durante la estación de lluvia, una fuente generadora de ruido.

Por otra parte, la abundante vegetación circundante unida a las irregularidades topográficas, provocan ruido de alta frecuencia (período corto) al ser ambas influenciadas por el viento.

Se observa la presencia de microsismos en el pico secundario, también con alta probabilidad de ocurrencia. Esto es debido a la influencia de las ondas oceánicas que afectan a todo el archipiélago de Cuba y están presentes, en mayor o menor medida, en todas las estaciones de manera relevante.

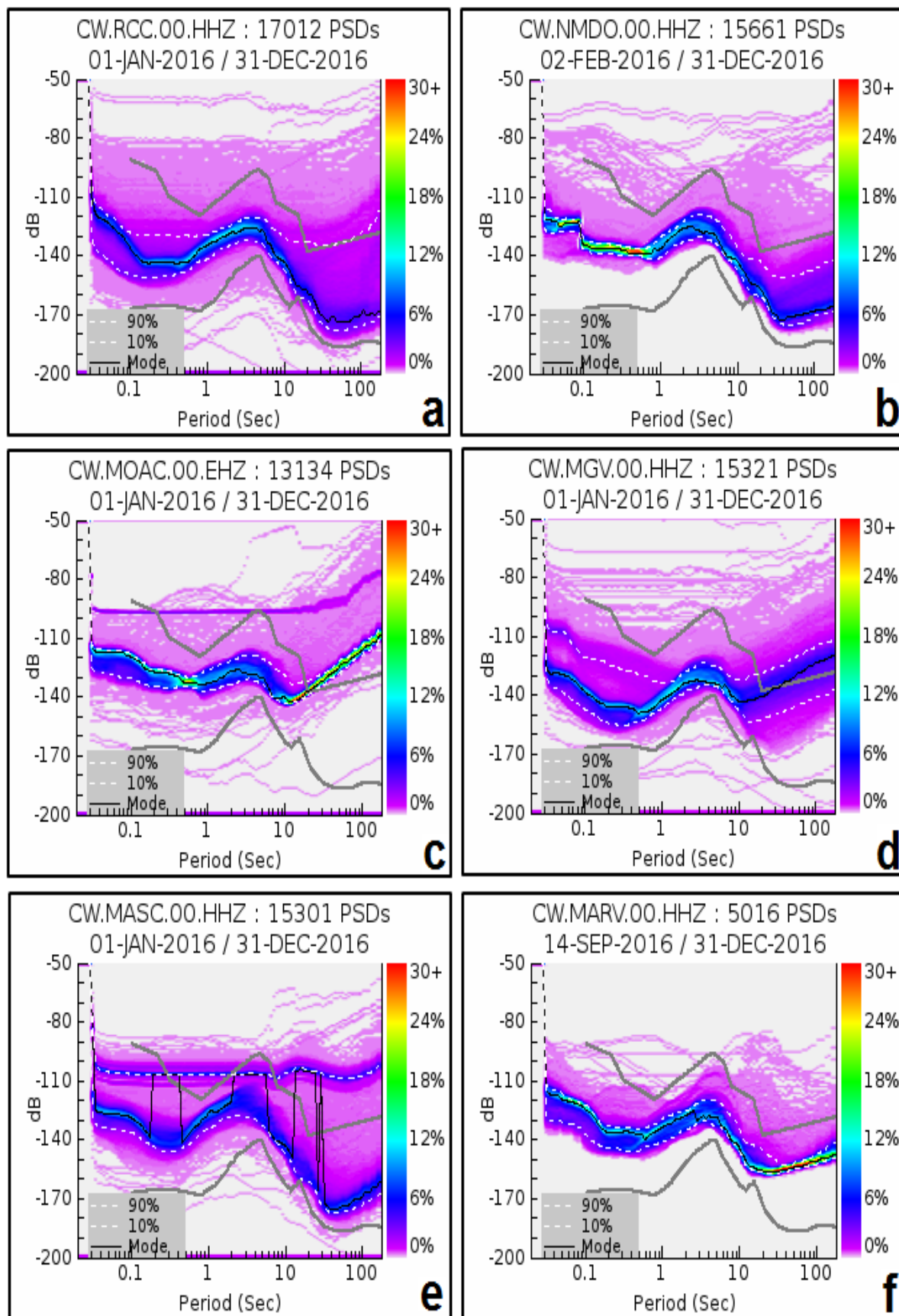


Figura 3.2a,b,c,d,e,f: Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones RCC, NMDO, MOAC, MGTV, MASC y MARV (variación anual)

No obstante estos detalles puntuales, las curvas de ruido obtenidas se encuentran dentro del rango que establecen los modelos de Peterson, por lo que se puede concluir que el emplazamiento tiene un nivel de ruido aceptable.

La estación NMDO, como se muestra en la figura 3.2b, tiene una probabilidad de ocurrencia muy alta en la zona de períodos cortos y sobrepasa los 30 dB al NLNM. Esto evidencia la presencia de un alto nivel de ruido causado por el hombre en la zona, probablemente influenciado por la operación de las maquinarias de la hidroeléctrica existente en las cercanías de la estación y por la influencia de los volúmenes de agua concentrados en la presa Nuevo Mundo. También hay que mencionar que a 5 Km de distancia aproximadamente se realizan a cualquier hora del día y la noche, trabajos de minería para la producción de níquel y cobalto.

Se observa de forma notoria el ruido producido por el segundo pico de microsismos debido a las mismas causas observadas anteriormente en el análisis del ruido de la estación RCC. En la zona de períodos altos, el nivel de ruido resulta bajo, llegando a alcanzar valores similares a los del modelo de NLNM de Peterson.

La figura 3.2c, corresponde a la PDF de la estación MOAC. En ella se observa la presencia de altos niveles de ruido en todo el período de interés, con alta probabilidad de ocurrencia.

En períodos menores a un segundo, el nivel de ruido está por encima del NLNM en un valor de 60 dB lo cual es provocado porque esta estación se encuentra instalada en los terrenos de la Universidad de Moa con gran presencia de actividad humana en los alrededores. Además esta estación presentaba una curva de calibración del sensor con errores en la determinación de la constante de generación del transductor así como en los polos de la respuesta en frecuencia.

También se pueden apreciar los picos de microsismos primarios y secundarios referidos anteriormente, este último presenta menor amplitud, pero con altísima probabilidad de ocurrencia respecto al primario, debido posiblemente a la gran cercanía de la estación a la costa.

En la Figura 3.2d, se muestran las curvas de PDF correspondientes a la estación MGV. Del análisis de este gráfico, se puede concluir que el ruido tiene un nivel bajo en corto período, (entre 20 dB y 40 dB aproximadamente por encima del modelo de Peterson de bajo ruido), con probabilidad de ocurrencia no muy alta que puede ser debido al ruido cultural del lugar. En la zona de microsismos de corto período también el nivel de ruido es bajo. Presenta alto nivel de ruido en períodos altos, sobrepasando el modelo de Peterson aunque con baja probabilidad de ocurrencia.

La figura 3.2e representa las curvas de PSD de la estación de MASC. Aunque el ruido presenta baja probabilidad de ocurrencia en todo el período. En la banda de cortos períodos (menor a 4 s), el nivel de la potencia de ruido está entre -110 dB y -150 dB, por lo que se puede considerar que la influencia del ruido cultural en este sitio es la que provoca esos valores. Esto lo corrobora el hecho del que el emplazamiento está un área en la cual existe actividad humana.

Los microsismos de período corto, tienen un valor de potencia de ruido alto entre -110 dB y -130 dB causado por el movimiento de las ondas oceánicas debido a que el sitio se encuentra cercano a la costa. En la zona de períodos largos el nivel de ruido es muy bajo entre 5 dB y 20 dB por encima del NLNM de Peterson.

Las curvas de PSD que se reflejan por encima del NHHM pueden haber sido provocadas por anomalías en el digitalizador debido a su baja probabilidad de ocurrencia.

La estación MARV, se puede catalogar como una estación ruidosa, y de muy mala calidad en este sentido, lo que puede ser puede determinar a simple vista en la figura 3.2f. Existe alta probabilidad de ocurrencia de los valores de la potencia de ruido en todo el período, fundamentalmente por encima de los 10 s, donde la probabilidad de ocurrencia del ruido es muy alta. Se observa la marcada influencia de los microsismos oceánicos, principalmente en períodos cortos con mucha mayor amplitud, como es usual, que en el caso de períodos largos.

Al igual que ocurre en las curvas de ruido de las estaciones analizadas anteriormente, la estación MARV evidencia una fuerte presencia en sus registros del ruido causado por el hombre. En general el nivel de ruido se encuentra entre los -110 dB y -160 dB. Es de importancia señalar que los datos de esta estación comprenden solo los meses de septiembre a diciembre, porque anteriormente no estaba instalada.

Las estaciones CHIV y LMGC, cuya distribución de potencia de ruido se muestra en las Fig. 3.3a y 3.3b, manifiestan un comportamiento similar en cuanto a valores que toman las PSD y también las PDF. Esto lo demuestra el comportamiento de la moda, que es la curva continua en color negro, como indica la leyenda. Como es característico en las curvas de las estaciones analizadas hasta ahora, estas también evidencian la presencia de ruido cultural en los alrededores, con altos valores en el rango de -110 dB a -120 dB. En períodos mayores a 10 s, existen valores muy bajos de ruido, aproximándose mucho a la curva de bajo ruido de Peterson.

Otro ejemplo de estación ruidosa es HLG, en la provincia de Holguín. Las curvas de PSD graficadas en la figura 3.3c, describen un comportamiento del nivel de ruido con valores altos en comparación a NLNM, en períodos cortos. Presentan también alta probabilidad de ocurrencia entre -110 dB y -120 dB, corroborado por el comportamiento de la moda, graficada en la figura en línea negra continua. Sin embargo en períodos largos se acerca en gran medida al NLNM. Es importante señalar que esta estación está ubicada en una unidad militar, donde hay actividad humana y además posiblemente túneles que puede influir de manera negativa en la propagación de la señal y en los niveles de ruido.

La estación CCCC, es ejemplo de una buena estación sismológica en cuanto a ruido sísmico se refiere. En todo el período se observa una distribución de potencia de ruido de muy baja probabilidad de ocurrencia. La curva que describe la moda presenta valores muy cercanos al NLNM, por debajo mayoritariamente de -140 dB. El emplazamiento en el que está instalada esta estación influye de manera positiva en los niveles de ruidos, ya que está ubicada dentro de un túnel que la protege de la influencia del ruido cultural. Además el lugar está apartado de

áreas donde habita el hombre, lejos de carreteras y de la costa, por esto último, el bajo nivel de ruido de los microsismos oceánicos.

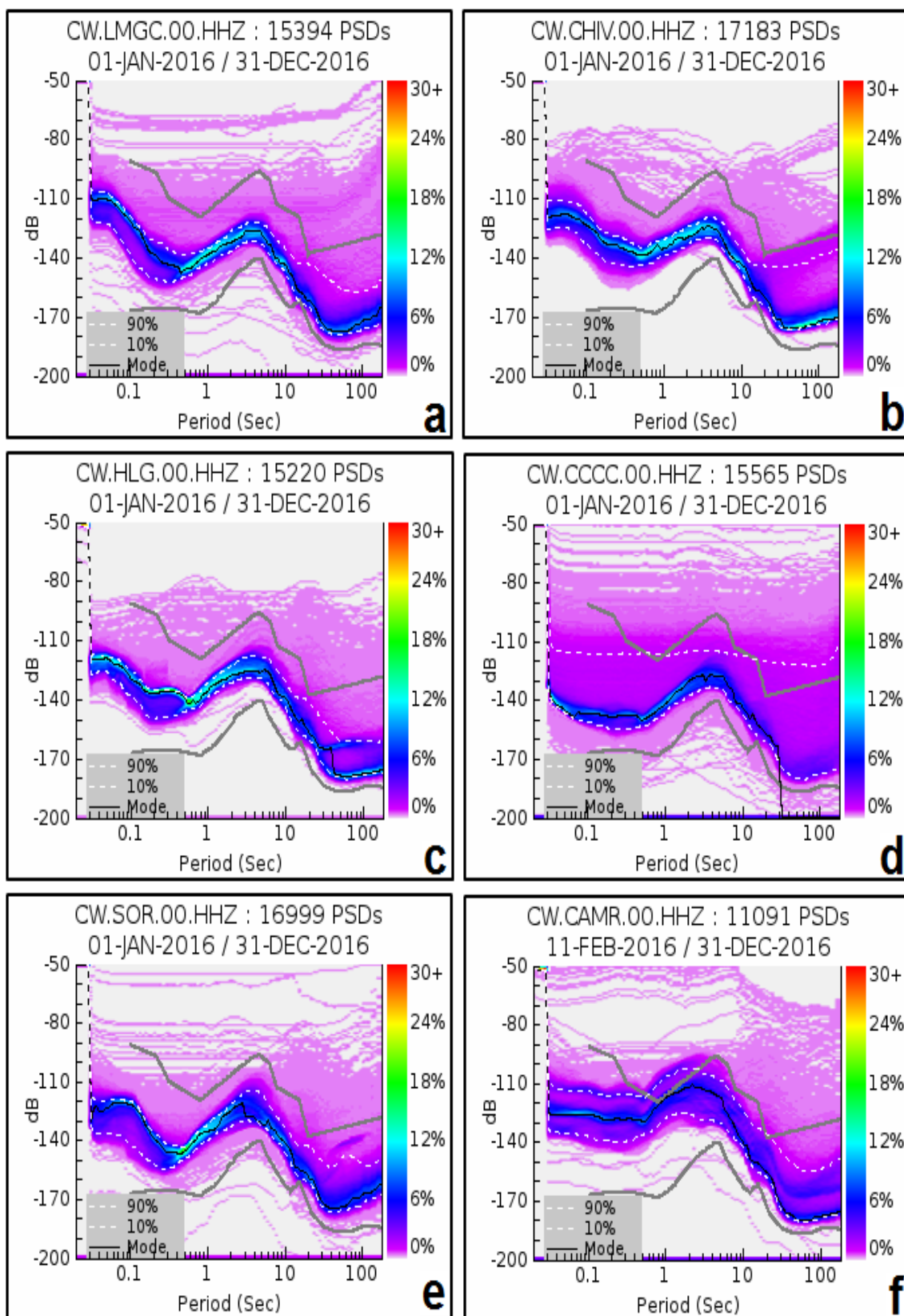


Figura 3.3 a,b,c,d,e,f: Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones LMGC, CHIV, HLG, CCC, SOR y CAMR (variación anual)

La estación más occidental existente en el país SOR, como muchas otras presentan niveles de ruidos provocados por la acción del hombre, para períodos menores a 5 s, que se encuentran en un rango de valores de potencia de ruido de -110 dB a -150 dB, como muestra la figura 3.3e. En períodos largos el nivel de ruido está por debajo de los -150 dB. Hay que destacar que en las cercanías al lugar donde está el emplazamiento hay una carretera por la que circula tráfico de forma significativa debido a la afluencia del turismo en esa zona.

Las curvas de PSD de la estación CAMR, mostradas en la figura 3.3f, muestra un nivel de ruido muy alto (-120 dB y -130 dB) en períodos inferior a un segundo, llegando a sobrepasar el NHNM. Esto pudo ser ocasionado por un cambio de ganancia del digitalizador, aumentando la amplitud tanto de la señal (terremotos) como del ruido. Esto se observa en la zona cercana a la curva de los valores de PSD que ocurren el 10 %. No obstante a eso la curva que representa el 90 % de ocurrencia de ruido y la moda indican que el nivel de ruido en general es alto, posiblemente ruido cultural provocado por la influencia humana en los alrededores. Los altos valores de la densidad espectral de potencia en la banda de microsismos de períodos cortos son influenciados por el movimiento de las olas del mar lo que afectan los registros de la estación en esa banda de frecuencia. En general esta estación se puede catalogar como muy ruidosa.

Para cada estación, se tomaron los valores de la densidad espectral de potencia en cada mes del año y se le calculó el valor medio. Esto con el objetivo de observar en que rango oscilan los valores de potencia de ruido promedio. La figura 3.4 muestra que estos valores están

aproximadamente entre -120 dB y -145 dB a excepción de la estación SOR en el mes de diciembre, donde notablemente desciende el valor de la PSD promedio.

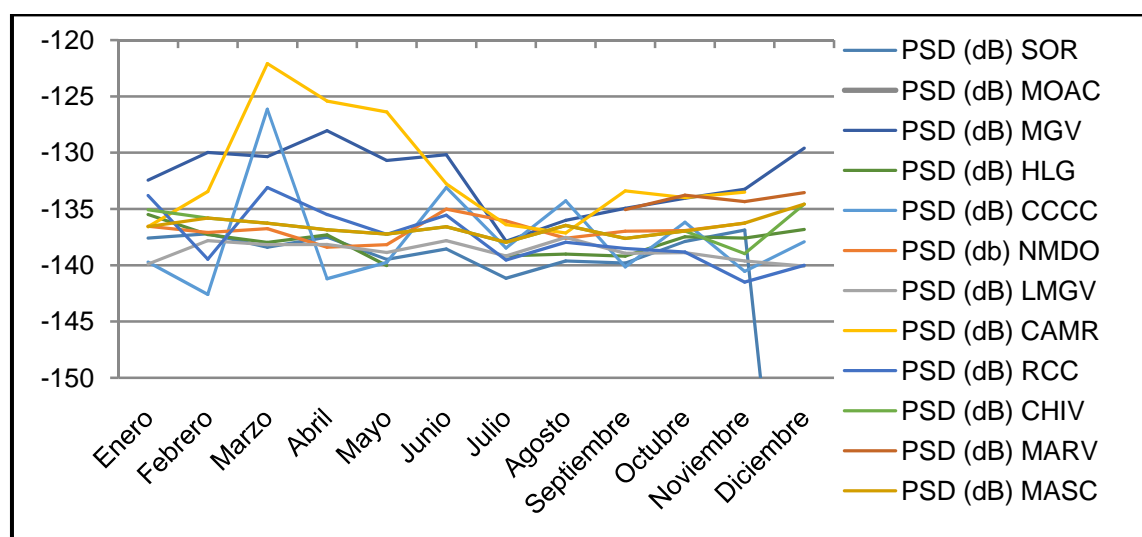


Figura 3.4: Variación mensual del valor de las PSD, durante 2016, para las estaciones de la red sísmica cubana

La mayoría de las estaciones están entre valores de PSD de -135 dB a -140 dB, alrededor de -133,8 dB de diferencia, lo que significa que la variación de potencia media en el año entre las estaciones es poco variable. Esto a excepción de las estaciones CAMR, MGV que en los meses de Marzo a Junio están por encima de los -135 dB y la estación CCCC en el mes de Marzo sobrepasando los -130 dB.

Los anexos B6, B7, B8 y B9 muestran el comportamiento de los valores medios de las PSD en las estaciones estudiadas.

3.4.2. Influencia de las variaciones diurnas y nocturnas

En esta sección, se analizará de qué modo inciden en los niveles de ruido las variaciones entre el día y la noche en cada una de las estaciones. En la figura 3.5 están representados los gráficos de las PSD y PDF de las estaciones RCC, NMDO, MOAC, MGV para el año 2016. Los gráficos de la derecha representan las PSD obtenidas de los datos pertenecientes al horario diurno (6:00 am - 6:59 pm). Los gráficos de la izquierda se obtuvieron para el horario de la noche (7:00 pm - 5:59 am).

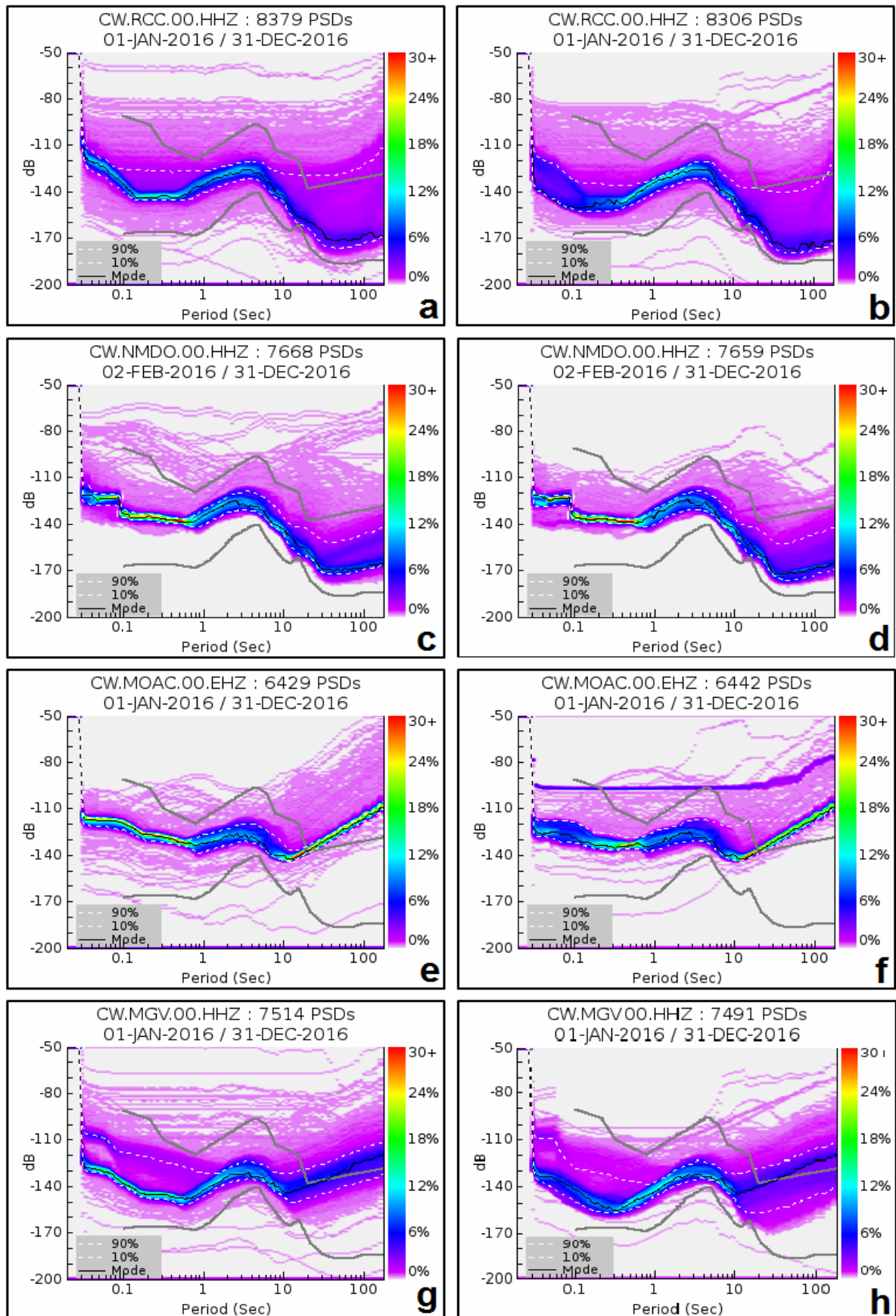


Figura 3.5 a,b,c,d,e,f,g,h: Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones RCC, NMDO, MOAC y MGV (variación diurna/nocturna)

Es fácil determinar que existe un cambio significativo en períodos cortos entre los horarios del día y la noche, para las estaciones que están representadas en la figura 3.5, excepto para la estación de NMDO donde no se observa una variación significativa. También se puede deducir que en el horario de la noche los ruidos de períodos cortos tienen menor probabilidad de ocurrencia, con respecto al horario del día para el mismo rango de período (< 1 s). Evidentemente esto es provocado por el ruido cultural, que está presente en mayor medida durante el día, donde hay más actividad humana. Sin embargo los picos de microsismos se mantienen prácticamente con la misma amplitud y probabilidad de ocurrencia, debido a que estos dependen de la influencia de las condiciones atmosféricas sobre el mar y del movimiento natural de la Tierra. En períodos largos las variaciones son prácticamente imperceptibles.

En la figura 3.6 también se representan las variaciones durante el día y la noche de las PSD y la PDF, pero en este caso para las estaciones MASC, MARV, LMGC, CHIV. Como en el análisis anterior, las principales variaciones de la potencia de ruido entre los horarios del día y la noche, se manifiestan en períodos por debajo de un segundo, que se originan por las acciones de la vida diaria del hombre y por la acción del viento sobretodo en lugares donde hay mucha vegetación.

Para períodos largos las variaciones entre los niveles de ruido del día y la noche se mantienen prácticamente igual, lo que da una medida de que no existe variación evidente influenciada por los cambios de temperaturas y presión atmosférica. Los valores de potencia de los microsismos también se mantienen prácticamente sin ninguna variación en los dos

períodos que se están analizando. En la figura 3.7 mostrada a continuación están graficadas las curvas de PDS para los horarios del día y la noche, de las estaciones HLG, CCCC, SOR y CAMR. Las variaciones principales se manifiestan para períodos menores de un segundo. Durante el día se presentan para estos períodos mayores niveles de potencia de ruido en comparación con el horario nocturno, influenciado por la actividad del hombre que son menos probables para este último.

En altos períodos las estaciones de HLG y CAMR son las únicas que evidencian una variación entre ambos horarios debido probablemente a condiciones específicas locales asociadas a algún tipo de actividad concreta. En el resto se mantiene sin mucha variación, esto lo demuestra los valores de potencia de ruido que representan el 10 %.

Los microsismos tanto de período corto como de período largo se mantienen sin variaciones significativas, esto debido a que la mayor influencia sobre los niveles de ruido de los microsismos oceánicos es producto a la influencia de las variaciones atmosféricas sobre el oleaje del mar.

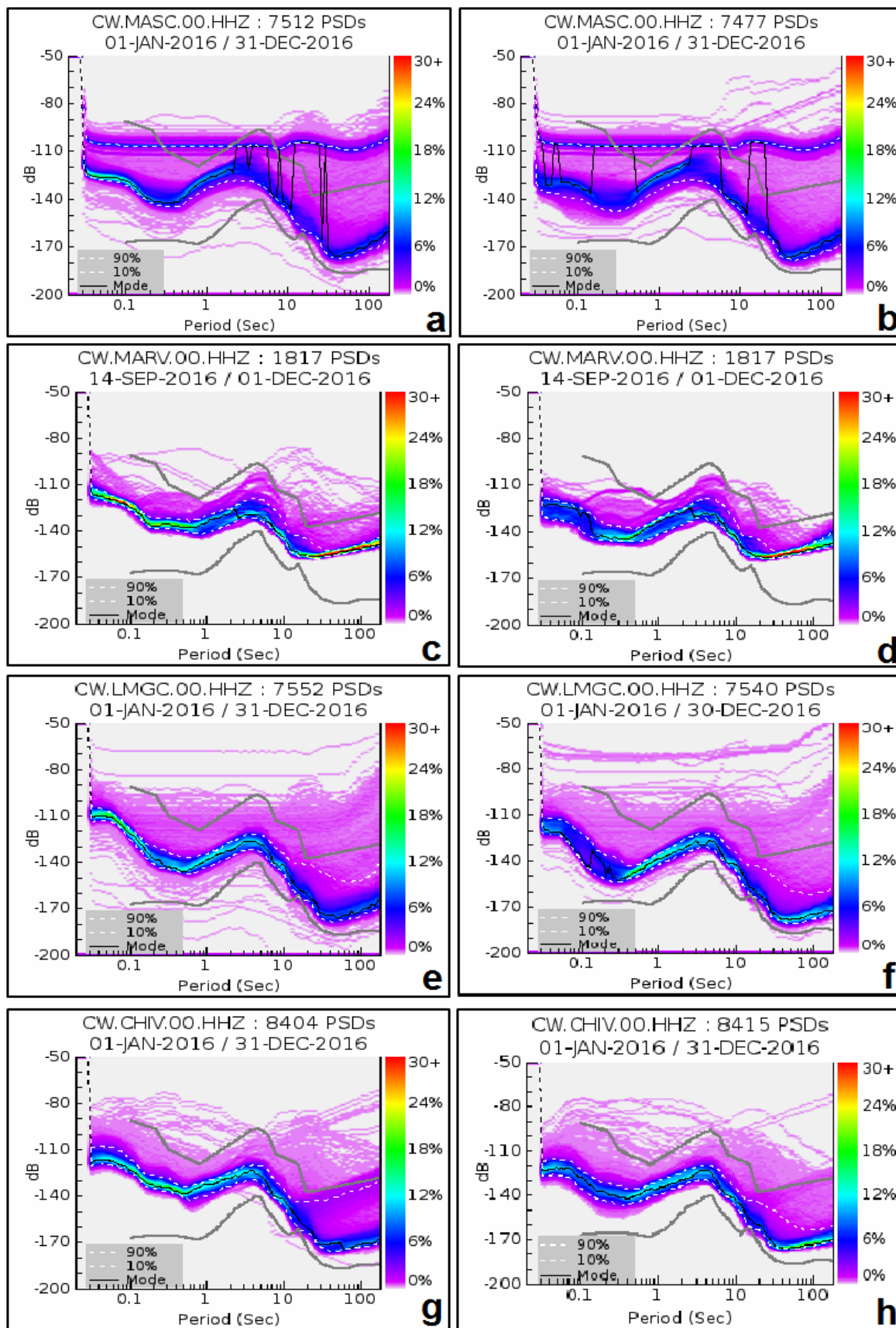


Figura 3.6 a,b,c,d,e,f,g,h: Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones MASC, MARV, LMGC y CHIV (variación diurna/nocturna)

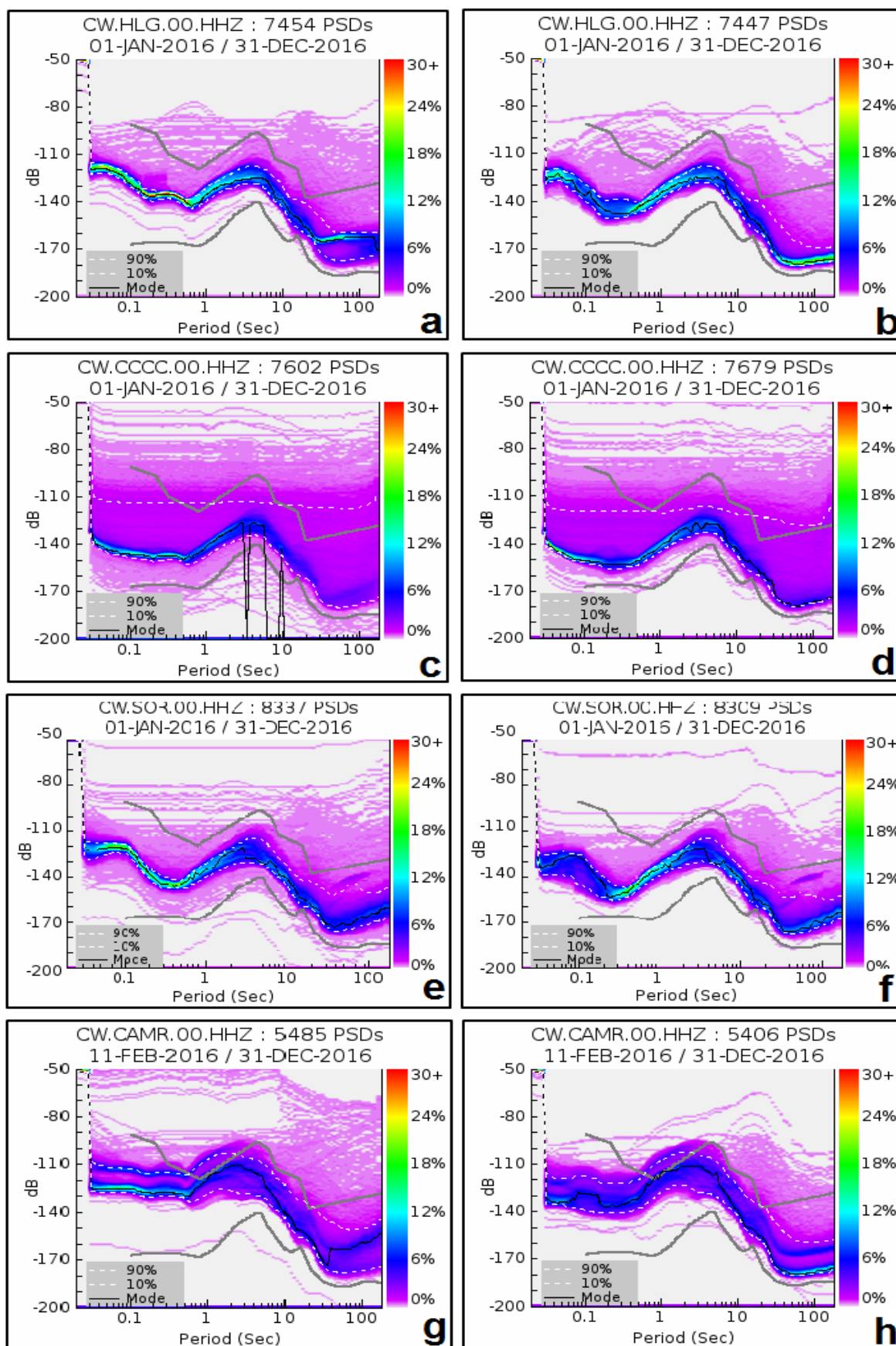


Figura 3.7a,b,c,d,e,f,g,h: Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones HLG, CCCC, SOR y CAMR (variación diurna/nocturna)

3.4.3. Efectos de los cambios estacionales (lluvia y seca)

Cuba tiene un clima marino tropical con temperaturas promedio de 20-26 grados Celsius para la mayoría del país con muy poca fluctuación en el clima, al menos para los estándares europeos. Las estaciones se pueden dividir a grandes rasgos en una estación de seca, que se extiende de Noviembre a Abril, y una húmeda, de Mayo a Octubre.

En la estación de seca, los días completamente despejados son más frecuentes, aunque la temperatura media es ligeramente inferior. Debido a su proximidad a Norteamérica los frentes fríos con fuertes lluvias, mar agitado y vientos en racha no son inusuales en este período, aunque no son tan frecuentes.

En la temporada de lluvias las temperaturas medias se elevan, así como el promedio de lluvias y la humedad. Las cifras de precipitaciones (1400 - 1600 mm) parecen altas, pero solo son el resultado de los chubascos fuertes y de corta duración.

Atendiendo a estas características del clima de Cuba, se determinaron las PSD y PDF correspondientes a las estaciones enmarcadas en el área de estudio en ambos períodos climáticos, con el objetivo de identificar la incidencia de estas variables en el aumento o disminución de los niveles de ruido en cada caso.

Del análisis de los gráficos de las señales de PSD de las estaciones de la red que son objetos de estudio, mostrados en las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se puede concluir que las variaciones en las estaciones del año no inciden de manera significativa en los niveles de potencia de ruido. Se puede observar que en casi todas las estaciones tanto en período de seca como en período de lluvia los gráficos son similares. Solo en la estación MGV se presenta para períodos altos una ligera diferencia, pero prácticamente se mantiene igual. Se observa también alguna diferencia no significativa en la probabilidad de ocurrencia del ruido, como se puede observar en todas las figuras entre ambos períodos del año.

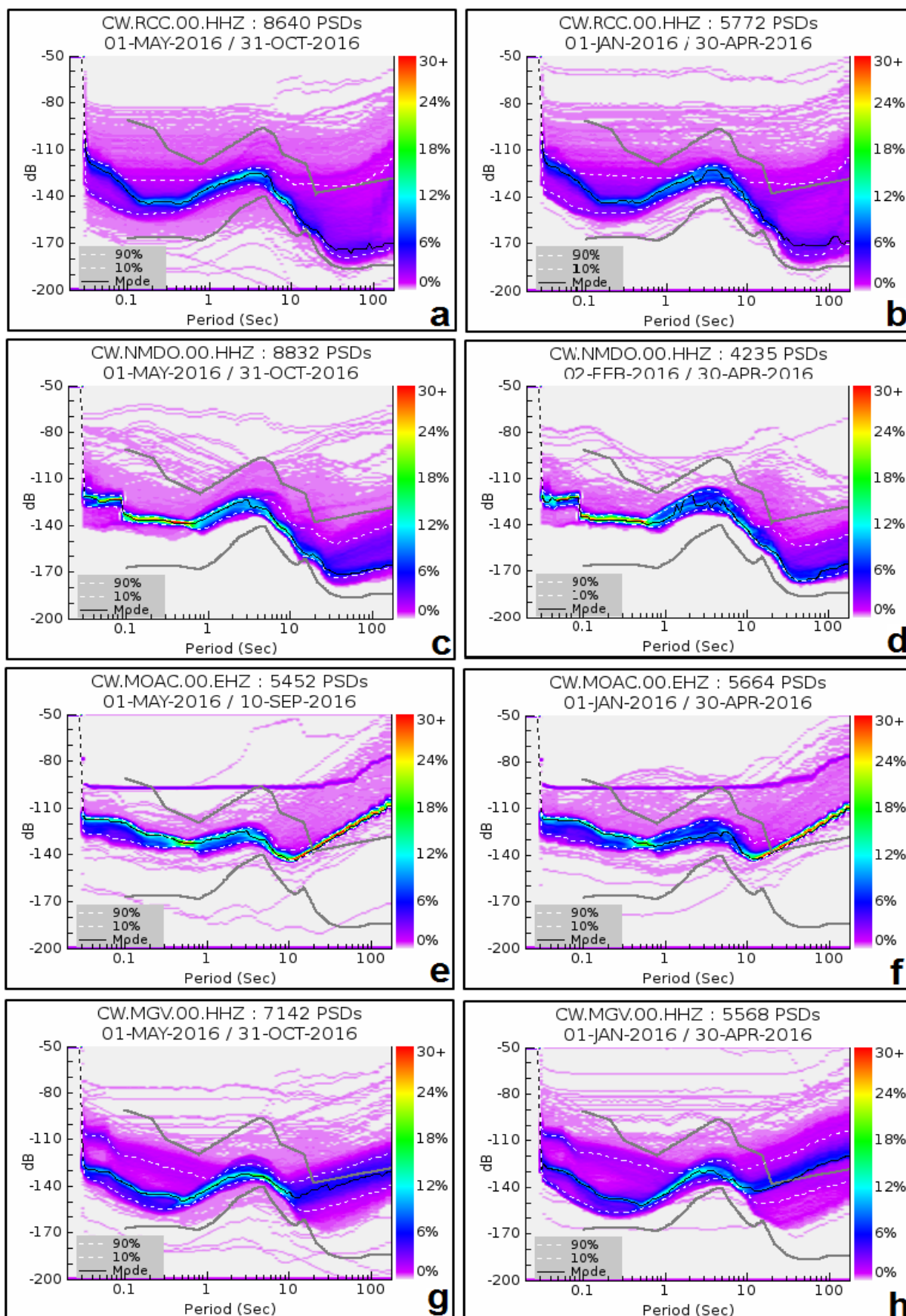


Figura 3.8 a,b,c,d,e,f,g,h: Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones RCC, NMDO, MOAC y MGV (variación estacional)

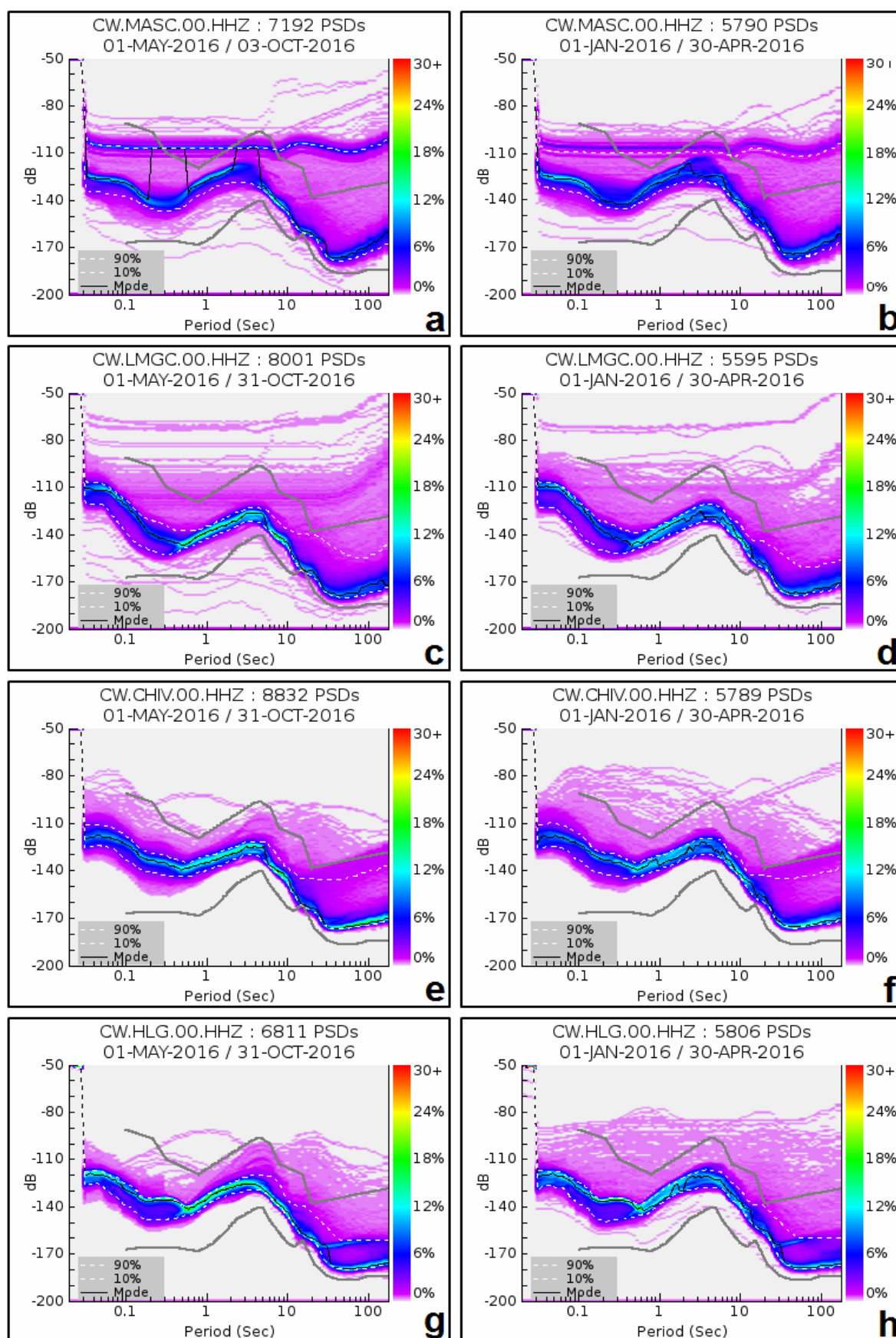


Figura 3.9 a,b,c,d,e,f,g,h: Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones MASC, LMGC, CHIV y HLG (variación estacional)

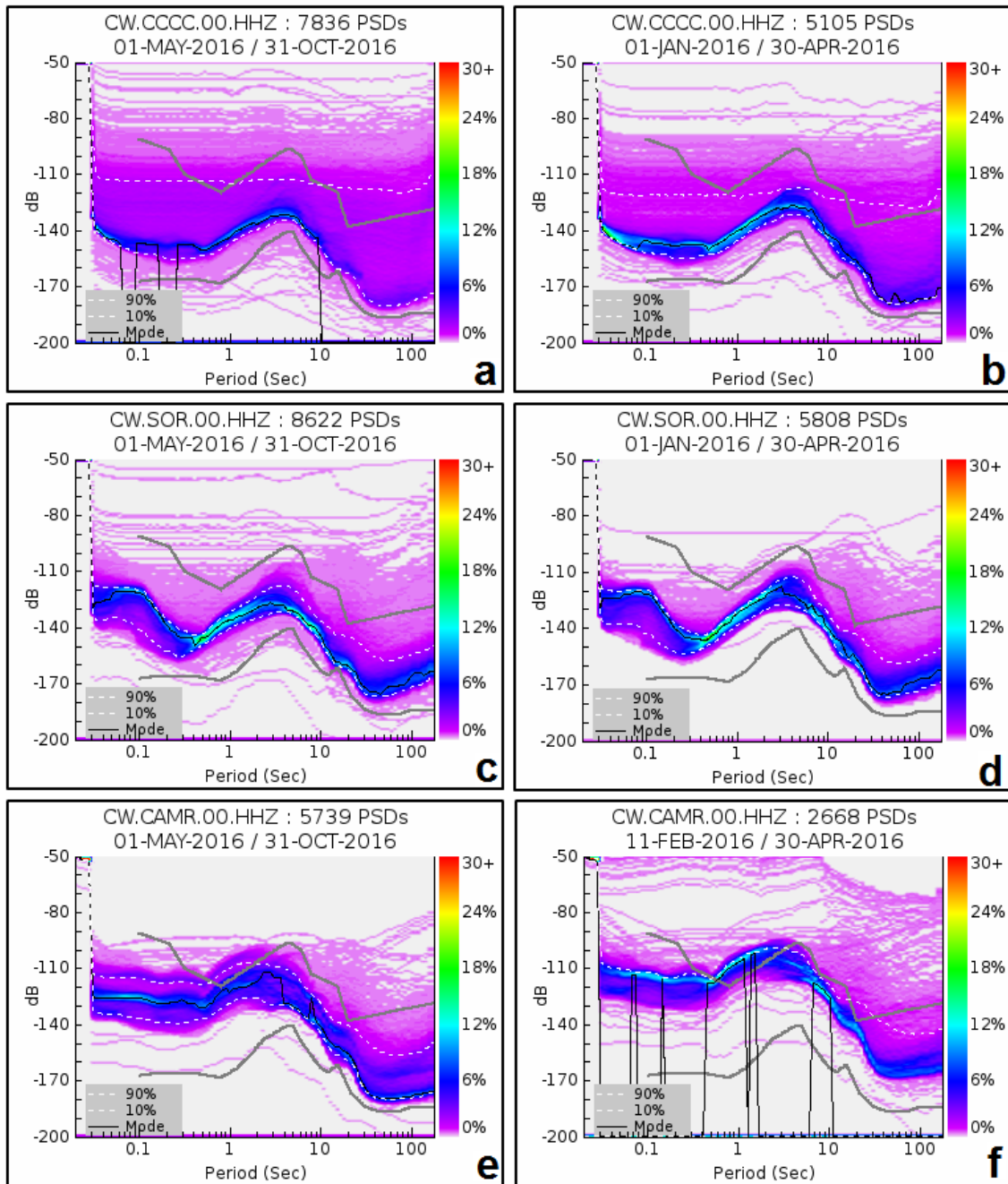


Figura 3.10a,b,c,d,e,f: Gráficos PDF correspondientes a la componente vertical de las estaciones CCCC, SOR y CAMR (variación estacional)

3.4.3.1 Relación entre los niveles de ruido de las estaciones y los eventos meteorológicos extremos. Huracán Matthew.

El único ciclón tropical que afectó a Cuba directamente en 2016 fue el huracán Matthew. Este organismo tropical llegó a la región más oriental de Cuba en las primeras horas de la noche (7 - 8 pm), del día 4 de Octubre, en la zona cercana a Punta Caleta, provincia de Guantánamo como un intenso huracán categoría 4 en la escala Saffir-Simpson.

Esto significó vientos sostenidos del orden de los 220~230 kilómetros por hora e intensas precipitaciones. De acuerdo a los reportes del Instituto de Meteorología de Cuba, se registraron, en la provincia Santiago de Cuba, olas entre 3 m y 4 m, lo cual provocó una elevación del mar de hasta 1,7 m, con inundaciones en las zonas costeras.

En la costa sur de Guantánamo, durante los días 4 y 5 de Octubre se registraron olas de 8 m y 9 m, con elevaciones del mar de alrededor de 3,5 m, mientras que en la provincia de Holguín, se observaron olas de 4 m a 6 m con ligeras penetraciones del mar.

Las precipitaciones se comportaron de manera creciente durante el paso del ciclón, situándose entre los 90 mm y 600 mm en 24 horas [73].

En el anexo B10 se muestra un mapa con la trayectoria del ciclón Matthew, donde se señalan con estrellas las estaciones RCC, MARV y NMDO, las más cercanas a la ruta de paso de este evento con disponibilidad de datos y operatividad esa noche.

Desde el punto de vista del ruido sísmico, el paso de Matthew, se evidenció en estas estaciones mediante el aumento de los niveles de potencia de ruido en alrededor de - 110 dB en la banda de 0,1s ~ 20s, esto incluye los microsismos de origen marino ocasionados fundamentalmente por el aumento del oleaje y el nivel del mar en toda la costa sur y noroeste de la región oriental.

La figura 3.11 muestra los gráficos de PSD y los estimados de probabilidad, PDF, correspondientes a la componente vertical de las estaciones RCC, NMDO y MARV durante los días 4 y 5 de Octubre del 2016 y las flechas indican el pico máximo de potencia de ruido registrado en ellas.

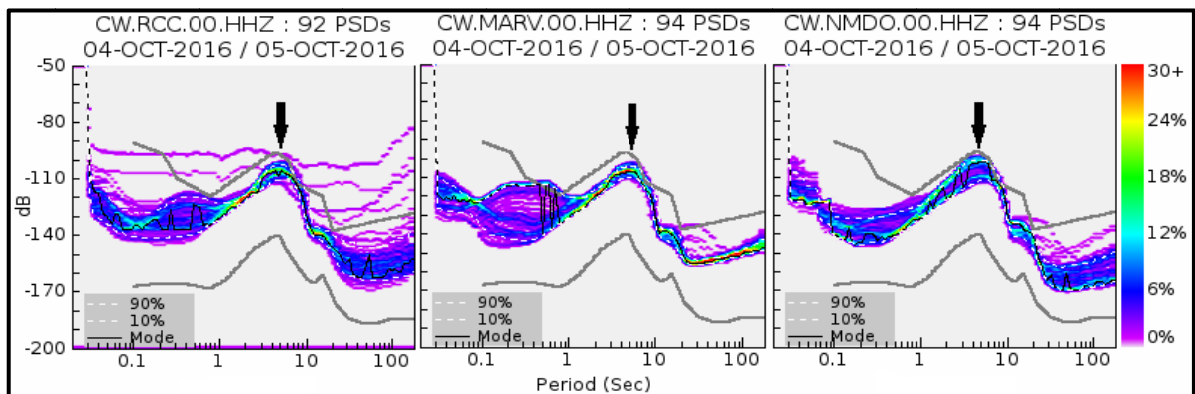


Figura 3.11: Gráficos PDF correspondientes a las estaciones RCC, MARV y NMDO durante el paso del huracán Matthew

En este sentido se observa en las figuras una alta probabilidad de ocurrencia de ruido (en el caso de MARV hasta del 30%) y valores de PSD cercanos o iguales a los que representa el NHNM de Peterson.

En la figura 3.12 se muestran los espectrogramas de las tres componentes (HHN, HHE y HHZ) correspondientes a la estación MARV, en los gráficos se aprecia claramente un aumento del ruido entre los valores de 0,1s y 20s en el día juliano 280, que corresponde al 4 de Octubre del 2016.

En la zona señalada enmarcada en un ovalo rojo se observó un aumento de las PSD de un 30% en la noche y la madrugada correspondiente al paso de Matthew, resultado consecuente con la estimación anterior sobre la probabilidad de ocurrencia de ruido.

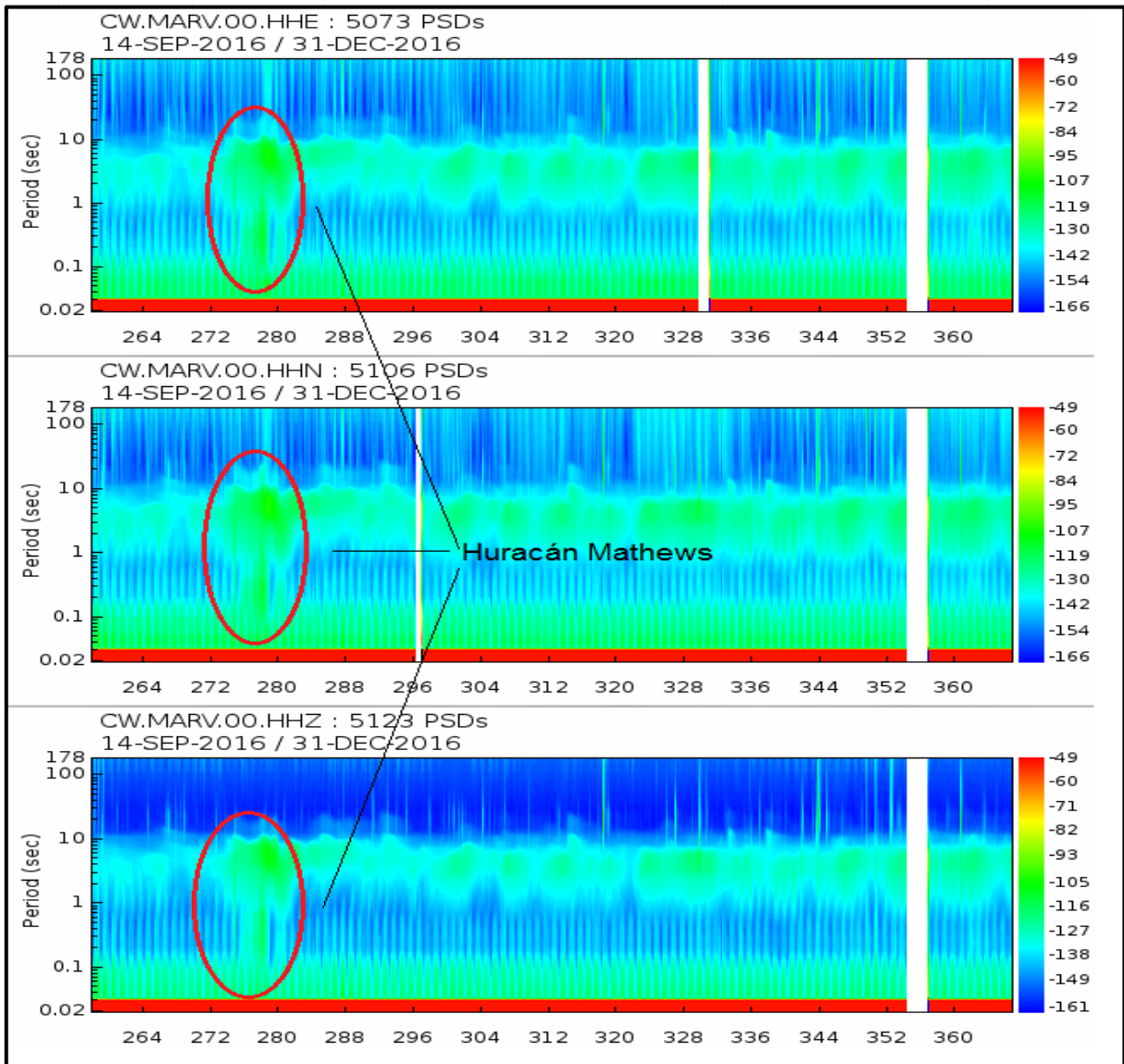


Figura 3.12: Espectrograma correspondiente a la estación MARV

3.4.3.2. Frentes fríos

En los primeros meses del año 2016 las situaciones meteorológicas más significativas a escala sinóptica fueron la presencia de sistemas invernales, como las bajas extra tropicales, los frentes fríos precedidos de fuertes hondonadas activas y de rápida intensificación (que llegaron a producir lluvias intensas y fenómenos severos, como caída de granizos), irrupción de aire frío en bajas latitudes y las vaguadas de ondas cortas en la troposfera baja y media.

En relación al ruido sísmico, la influencia de estos frentes fríos se manifiesta, de manera similar a la de los ciclones tropicales mostrados arriba, por ejemplo, para el caso de un frente frío que penetró por la parte occidental de Cuba el día 24 de Febrero de 2016, en la figura 3.13 se muestran los gráficos correspondientes a las estaciones SOR y CAMR, las más próximas al extremo occidental del país.

En ambos casos se observa un incremento de los niveles de PSD y de la probabilidad de ocurrencia de ruido, no solo en la zona de microsismos de origen oceánico sino también en la banda de 20s a 100s, donde probablemente se originen ruidos por efecto de variaciones abruptas de temperatura y presión atmosférica que provocan descompensaciones térmicas y derivas de señal en los sensores, además del efecto de inclinación que genera una componente adicional a la señal definida por relaciones trigonométricas. El origen de este tipo de señal de ruido está causado por el insuficiente aislamiento térmico de estos instrumentos así como la no correcta nivelación de los pedestales donde se instalan los sensores.

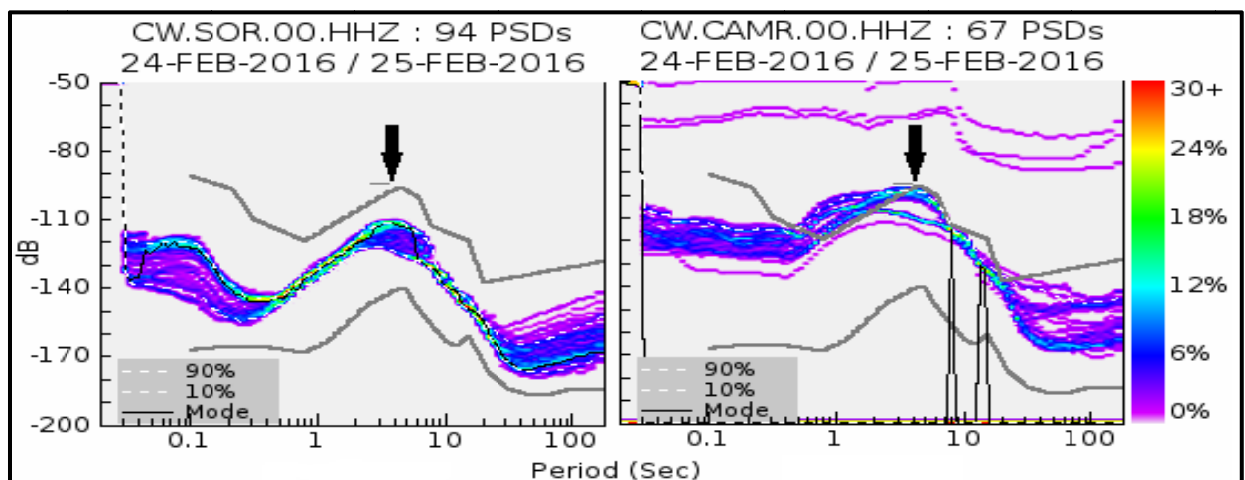


Figura 3.13: Gráficos PDF correspondientes a las estaciones SOR y CAMR durante el paso de un frente frío

3.4.4. Cambios instrumentales

El análisis del ruido en las estaciones es utilizado también para detectar o evaluar algunos cambios de instrumentación que se producen, de manera lógica en las estaciones, provocado por roturas, cambio de equipamiento, entre otros. El análisis de estas señales antes y después de los cambios permite determinar si los sensores y digitalizadores instalados fueron seleccionados de manera óptima, si no existen errores en las funciones de transferencia de estos y además controlar si la instalación de los instrumentos fue correcta y no existen excesivas desviaciones por el efecto de inclinación u otras causas técnicas.

En la figura 3.14 se muestran los gráficos de PDF correspondientes a la estación CAMR, donde después de su instalación, con una determinada ganancia en el digitalizador y teniendo en cuenta la sensibilidad del sismómetro instalado, se observaron altos niveles de ruido. Las fechas amarillas señalan las curvas de PSD correspondientes, donde se apreció un incremento de hasta 15 dB en el nivel de ruido incluso sobrepasando el modelo NHNM de Peterson y por lo tanto inadmisibles desde el punto de vista sismológico, mientras que las flechas negras indican los valores de PSD asociados a una disminución de la ganancia del digitalizador Centaur, hasta situarla en el rango correcto.

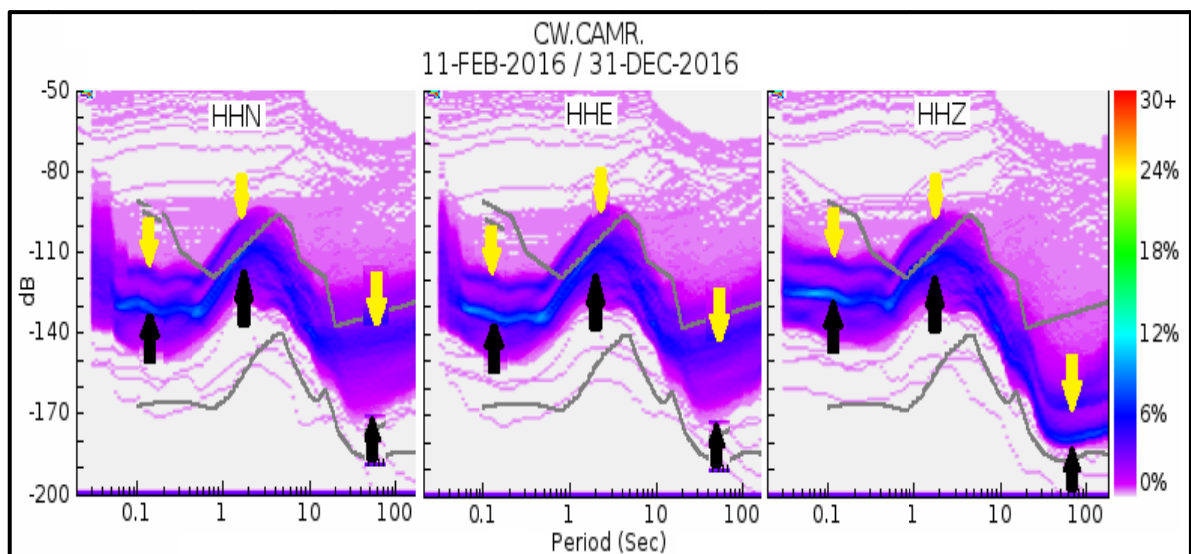


Figura 3.15: Gráficos PDF correspondientes a la estación CAMR afectada por cambio instrumental

3.5. Recomendaciones para la reducción de los valores de PDS de las señales de ruido en los emplazamientos.

Tomando en consideración los resultados obtenidos, hay que volver a destacar que, independientemente de que la mayoría de las estaciones son ruidosas, los niveles de ruido encontrados, nunca exceden en toda la banda de frecuencia, los valores de la curva de NHNM, lo que es un buen resultado si se tiene en consideración que este límite representa, como se ha dicho anteriormente, el peor caso de nivel de ruido que puede ser admitido para una estación sismológica.

No obstante es de gran importancia ser conscientes de los niveles de ruido de la red ya que aunque el equipamiento a instalar sea de gran calidad, con un gran ancho de banda y rango dinámico, las características de estos no estarían aprovechándose al máximo debido justamente al ruido. Además si el nivel de ruido cultural es muy grande, o existen picos de gran magnitud, se necesitará configurar altos niveles de umbrales de disparos en los algoritmos de detección, lo que trae como consecuencia un bajo nivel de detección de la red.

Mientras más largo es el ancho de banda de los sismómetros instalados en la red, mayor es la cantidad de fuentes generadoras de ruido que pueden influir en la señal sísmica. En este caso todos los sensores seleccionados para el estudio tienen un gran ancho de banda y rango dinámico, por lo que se ven afectados por un amplio espectro de señales perturbadoras.

Mayoritariamente, según los resultados obtenidos, en alta frecuencia (> 1 Hz), es donde se evidencian notables niveles de ruido con alta probabilidad de ocurrencia, provocados por la actividad del hombre en las cercanías de las estaciones. Esta es la causa general y más probable de la existencia de ruido sísmico en los emplazamientos de la red cubana.

En muchos casos es un poco difícil seleccionar un sitio para instalar una estación sismológica donde el ruido cultural no influya en mayor o menor medida, debido a que para la selección de un sitio hay que tener en cuenta muchos requisitos que, en algunas ocasiones son difíciles de cumplir por disímiles motivos.

Algunas veces es prioridad la seguridad del equipamiento por encima de los niveles de ruido cultural que puedan existir. Es por eso que se eligen sitios donde en las cercanías hay personas, o sitios que se encuentran en el interior de instituciones pertenecientes al gobierno que, de una manera u otra, se comprometen a tener cierta responsabilidad en el cuidado de los equipos instalados en la estación.

También influye, debido a que lo ideal es que los sitios estén alejados de la ciudad, la disponibilidad de infraestructura tecnológica por parte de la compañía de telecomunicaciones. Es común encontrar buenos emplazamientos desde el punto de vista geológico, con bajos niveles de ruido, pero por el hecho de estar alejados de poblados o ciudades donde no existe una infraestructura tecnológica estable y fiable, estos no se tienen en cuenta.

En tal sentido los enlaces satelitales que resuelven en gran medida este inconveniente resultan ser costosos en Cuba para su despliegue y operación por parte del proveedor de servicios de comunicación, por lo que solo se hace uso de esta tecnología en casos excepcionales.

Otro elemento a tomar en consideración es la accesibilidad al lugar, pues la ausencia de vías adecuadas de acceso al sitio de emplazamientos de la estación provoca que no se pueda efectuar un adecuado mantenimiento y alargaría el tiempo de reparación del equipamiento en caso de ser necesario.

Es por eso que siempre hay que buscar la mejor solución que permita un equilibrio en la relación costo beneficio, siempre tratando de no comprometer las especificidades de la estación desde el punto de vista sismológico.

En el caso del nivel de ruido encontrado en bajas frecuencias (0,2 mHz a 50 mHz), estos son consecuencias del tilt provocado por la influencia de las variaciones de la presión

atmosférica sobre la caseta, el suelo y el sismómetro. Otras causas de ruido de período largo son los cambios bruscos de temperatura, el suelo poco consolidado y el tilt provocado por el tráfico local y la presión del viento dentro de la caseta. Solo las estaciones MGV, MARV, presentan altos niveles de ruido en esta banda de frecuencia, lo cual es muy curioso debido a que en la mayoría de las estaciones, no se han tenido en cuenta en muchas ocasiones, el aislamiento térmico de sensor. Aunque se ha tenido bastante en consideración evitar la circulación de aire dentro del emplazamiento.

Esto da una medida de que las variaciones de temperatura dentro de las casetas no son bruscas, además no existe mucha variación en la presión atmosférica que incida de forma negativa en los niveles de ruido, u otra fuente de disturbio en estas frecuencias. Es de particular atención este caso porque los sensores de banda ancho son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura y presión.

En la banda de frecuencia donde se manifiestan los microsismos oceánicos, para las estaciones incluidas en el estudio, se obtuvieron grandes valores de densidades espectrales de potencia de ruido, para el caso del pico de microsismos secundario. No siendo así, en el caso del pico de microsismo primario en el que en la mayoría de los casos a excepción de las estaciones de MARV y MGV, los niveles de ruido son bajos. Además en la estación de MARV, se obtuvo gran probabilidad de ocurrencia de este tipo de ruido, justamente por estar cercana a la costa.

Es muy difícil evitar la influencia de estas fuentes de ruido, en los registros sísmicos. Tanto para el caso de las estaciones cercanas a la costa, como para el caso de estaciones instaladas en el centro de continentes, aunque en este último caso, los niveles de ruido deberían de ser menor. También se llegó a la conclusión de que los picos de microsismos marinos, no varían significativamente los niveles de PSD en las diferentes estaciones del año. La causa

probable de esto pudiera ser los pocos cambios en el clima cubano. Aunque si se demostró que en el caso de la presencia de eventos meteorológicos cercanos a Cuba, si hay un incremento notable de los niveles de ruido a frecuencias medias.

Con relación a los métodos para atenuación del ruido sísmico, se pueden dividir en dos grupos, uno a partir del procesamiento digital de la señal y el otro a partir del modo de instalación del sensor y tipo de estructura en la que está instalado el mismo.

Desde el punto de vista del procesamiento digital de señales, como se ha mencionado anteriormente en el Capítulo 1, se puede recurrir al filtrado digital de señales. Este método es de gran ayuda en el caso de que se conozca con bastante certeza el tipo de señal que se desea eliminar y la frecuencia en la que ésta se manifiesta, para de esta manera poder elegir el tipo de filtro, así como el orden del mismo.

En el caso de la red cubana, ya este tipo de técnica para eliminar el ruido es bastante empleada por los analistas del SSN. Muchas veces la práctica y experiencia permiten que esta tarea sea casi automática.

Otro método muy usado, sobretodo en redes sísmicas regionales y mundiales, es la atenuación del ruido a partir del uso de estaciones en configuración de “arreglos sísmicos”. El uso de estos arreglos atenúa el ruido de una manera más segura pues no se corre el riesgo de perder parte de la información útil como ocurre en el caso del filtrado tradicional. No obstante a eso, el despliegue de una red que conforme un arreglo sísmico es bastante costoso y depende, eventualmente, de los objetivos de la red.

Dado que en la red cubana, por las distancias a las que se encuentran ubicadas las estaciones, las mismas no conforman un arreglo, es imposible en estos momentos poder implementar estos métodos de filtrado tan efectivos y tan usados internacionalmente.

Otro modo de atenuar los niveles de ruido es a través de la instalación de los sensores en los llamados emplazamientos de pozo. Aunque el ruido sísmico es reducido considerablemente con la instalación del sensor en pozos o en minas, esto no es necesariamente cierto. Debido a las condiciones geológicas la señal en profundidad puede atenuarse, reduciéndose así la relación señal a ruido. No obstante a eso el efecto de la variación de la presión atmosférica sobre las componentes horizontales, es reducido en más del 90 % a una profundidad de 150 m. Por su parte el ruido cultural, también se atenúa en la medida que aumenta la profundidad, no obstante a ello se ha demostrado que a profundidades mayores de 100 m no se obtienen grandes beneficios.

El costo de la perforación de un pozo y del proceso de instalación, se hace mayor a medida que aumenta la profundidad del pozo. Grosso modo el precio de un pozo es de 100 euros por metro, más el costo del equipamiento. Dada las condiciones económicas de Cuba, de las cuales el CENAIIS no está exento, sería poco viable reinstalar algunas de las estaciones en emplazamientos de pozo, a menos que se tenga financiamiento para ello.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se recomienda promover y practicar una mejor selección de los emplazamientos donde se instalan las estaciones, permitiendo lo más estrictamente posible que se cumplan con las especificidades desde el punto de vista sísmico y lo más alejadas posibles del ruido cultural. Además, tener en cuenta una construcción adecuada de las casetas donde se instalan los sensores así como garantizar un buen aislamiento térmico en las ya existente como en las futuras. También realizar una instalación lo más rigurosa posible de los sensores de banda ancha.

3.6. Conclusiones parciales

- El rango de frecuencia de las señales sísmicas que son objeto de estudio se encuentra entre 0,008 Hz y 50 Hz, y está determinado por el canal de registro sísmico.

- Se demostró que los picos de microsismos marinos se evidencian de manera significativa en las curvas de PSD de todas las estaciones incluidas en el estudio, debido a que Cuba es un archipiélago y por tanto todos los sitios de una manera u otra se encuentran cercanos a la costa. Para la red cubana los valores obtenidos están en el rango entre 2s – 20s aproximadamente.
- Se demostró que en las estaciones de la red, la presencia de ruido cultural para períodos menores que un segundo, provocado por la actividad del hombre en los alrededores y la influencia del viento sobre la vegetación y las irregularidades topográficas.
- Se comprobó que el ruido cultural, es el que más afecta de forma negativa el análisis de terremotos, pues en el rango de 0,05 s a 1 s se encuentran las señales correspondientes a los terremotos locales de baja magnitud, que son los que mayoritariamente se analizan en la red.
- Se determinó que las variaciones de los niveles de potencia de ruido entre el día y la noche muestran que se encuentran los mayores valores para el horario diurno. Esto debido a que en las horas del día la actividad humana es más frecuente.
- Se determinó que las variaciones entre las estaciones del año (lluvia y seca) no influyen de manera significativa en las variaciones de las señales de potencia de ruido.

CONCLUSIONES

Como resultado final de esta investigación, se propone un estudio, no realizado anteriormente, del ruido sísmico en el SSN cubano usando las metodologías que se emplean a nivel internacional, lo que permite darle solución a las interrogantes científicas planteadas como premisas de esta investigación.

A partir de este resultado, se plantean las siguientes conclusiones generales de la investigación:

- Se corroboró que el ruido sísmico tiene un origen multi-causal, donde influyen elementos internos y externos, lo cual complica su análisis como fenómeno natural.
- Se comprobó que el ruido sísmico es un proceso que se describe en frecuencia, mediante el uso de la función PSD, que influye en el registro de una señal sísmica, contaminándola y disminuyendo el umbral de detección real de una red por la reducción del rango dinámico efectivo del canal de registro.
- Se demostró que, de forma general, los niveles de ruido en las estaciones del SSN son aceptables, por cuanto sus valores de PSD se encuentran en la zona considerada adecuada para el registro de los terremotos, de acuerdo a los estándares usados en la comunidad científica internacional. No obstante a eso se pueden calificar como ruidosas, fundamentalmente en la banda de altas frecuencias.

- Se determinaron los rangos de frecuencia en que los que se manifiesta el ruido sísmico para la zona objeto de estudio a partir del análisis estadístico de las funciones PDF, haciendo énfasis en las variaciones anuales, horarias y estacionales, así como la valoración de la influencia de fenómenos meteorológicos extremos y errores en la concepción del canal de registro sísmico y en función de esto se sugirieron acciones para la posible mitigación de sus efectos.

RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten proponer una estrategia posterior que sirva como punto de partida para el desarrollo y/o continuación de investigaciones en esta línea y que contribuyan al mejoramiento de la calidad del dato registrado por la red del SSN, con el objetivo de perfeccionar, cada vez más, la producción científica del CENAIS.

En este sentido se recomienda, para investigaciones posteriores, lo siguiente:

- Extender el estudio de ruido a las estaciones que motivos diversos ajenos al autor no fueron incluidas.
- Determinar la relación señal a ruido para diferentes eventos en todas las estaciones pertenecientes a la red.
- Determinar el nivel de detección de la red a través de la relación señal a ruido, teniendo en cuenta además la profundidad a la que ocurren los terremotos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Briceño, J.E., 2012. Principios de las Comunicaciones, Edición Digital III.
- [2] Flores, J.M., 2014. Tutorial ruido. Curso Instrumentación y Señales. CCADET-UNAM.
- [3] Stacey, F. y Davis, P., 2014. Physics of the Earth. Four Edition. Cambridge University Press, online ISBN: 9781316180013.
- [4] Havskov, J., Alguacil, G., 2016. Instrumentation in Earthquake Seismology, Second Edition.
- [5] Herrmann, R. B., 2013. Computer Programs in Seismology: An Evolving Tool for Instruction and Research. Seismological Research Letters, v. 84, p. 1081-1088, ISSN 0895-0695.
- [6] Peterson J.; 1993: Observation and modelling of seismic background noise. USGS, Open file Report 93-322, 95 pp.
- [7] McNamara D.E. and Buland R.P, 2004. Ambient Noise Levels in the Continental United States, Bulletin of the Seismological Society of America 94 (4), DOI: 10.1785/012003001.
- [8] Diez, E, Cutié, M., Montenegro, M., Palau, R., Poveda, V., Yinxing, Z., Yang, C., Fengxia, W. 2014. Modernización de la Red Sísmica Cubana. Instalación, Calibración y puesta a punto. Revista de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, Vol. 29, N° 2, ISSN 0798-4065, indexada en SciELO, Latindex.
- [9] Catálogo de terremotos 2017. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS). Fondos del CENAIIS.
- [10] Ottemöller, L. y Havskov, J., 2011. Challenges When Establishing a Seismic Network. Seismological Research Letters, v. 82, p. 373-374, ISSN 0895-0695.
- [11] Ringler, A., Steim, J., van Zandt, T, Hutt, C., Wilson, D. y Storm, T. 2016. Potential Improvements in Horizontal very Broadband Seismic Data in the IRIS/USGS Component of the Global Seismic Network. Seismological Research Letters, v. 87, p. 81-89, ISSN 0895-0695, First published on December 16, 2015, doi: 10.1785/0220150181.
- [12] IRIS, 2017. Incorporated Research Institutions for Seismology. <https://www.iris.edu/hq/>

- [13] Kazufumi, I., 2014. Stochastic Process and Applications, Department of Mathematics, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA, October 6.
- [14] Miller, S. L. y Childers, D., 2004. Probability and random processes: with applications to signal processing and communications. Elsevier Academic Press. ISBN: 0121726517.
- [15] Pavliotis, G., 2014. Stochastic Processes and Applications ISBN: 978-1-4939-1322-0 (Print) 978-1-4939-1323-7 (Online), Volume 60.
- [16] Gallager, R., 2013. Stochastic Processes: Theory for Applications.
- [17] Hayek, B., 2015. Random processes for engineers. Cambridge University Press. ISBN 9781107100121.
- [18] Shreve, S., y Karatzas, I., 1987. Brownian motion and Stochastic Calculus.
- [19] Lemons, D., Langevin, P., 2002. An introduction to stochastic processes in physics: containing "On the theory of Brownian motion", Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- [20] Khintchine, A., 1934. Korrelationstheorie der stationären stochastischen Prozesse. *Mathematische Annalen* 109 (1): 604–615. doi:10.1007/BF01449156.
- [21] Wiener, N., 1964. Time Series. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts. p. 42.
- [22] Klipec, B., 1967. Reducing Electrical Noise in Instrument Circuits, *IEEE Transaction on Industry and General Applications*.
- [23] Moreno, B., Grandison, M. y Atakan, K., 2002. Crustal velocity model along the southern Cuban margin: Implications for the tectonic regime at an active plate boundary. *Geophys. J. International*, ISSN: 1365-246X. 151: 632-645.
- [24] Moreno, B., 2003. The crustal structure of Cuba derived from receiver function analysis. *J. Seismol.* 7. ISSN: 1383-4649, 359-375.
- [25] Ringler, A.T., Gee, L.S., Hutt, C.R. y McNamara, D.E., 2010. Temporal Variations in Global Seismic Station Ambient Noise Power Levels. *Seismological Research Letters*, v. 81, p. 605-613, ISSN 0895-0695.
- [26] Bormann, P., 2002. IASPEI, New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), Volume 1, Volume 2.
- [27] Young, et al, 1996. A comparison of the high – frequency (> 1Hz) surface and subsurface noise environment at three sites in the United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86, 1516 - 1528.
- [28] Wielandt, E., 2002. Seismicsensors and their calibration, charter five. IASPEI Manual of Seismological Observatory Practice, NMSOP, Potsdam.

- [29] Frequency range of seismic sensors. IASPEI Manual of Seismological Observatory Practice, NMSOP, Potsdam.
- [30] Havskov, J., 2002. IASPEI Manual of Seismological Observatory Practice”, NMSOP, charter 8, Seismic networks, Potsdam.
- [31] Pazos, A., 2004. Estación sísmica digital. Tratamiento digital de señales, PhD. Thesis. ROA Bulletin 02/04, Real Instituto y Observatorio de la Armada, San Fernando, Cádiz, Spain.
- [32] Webb, S., 2001. A broadband ocean bottom seismometer system based on a 1 Hz natural period geophone. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Volumen 91, Nro 2, pp 304-312, ISSN: 0037-110.
- [33] Nanometrics INC., 2017. Seismometer catalog, <http://www.nanometrics.ca/>, consultado 2018.
- [34] Oppenheim, A. V. y Schaffer, R. V., 2009. Discrete Time Signal Processing, (third edition). Prentice Hall, ISBN-13: 978-0132146357.
- [35] Scherbaum, F., 1996. Of Poles and Zeros, Fundamentals of Digital Seismology. Kluwer Academic Press.
- [36] Rodgers, P. W, Martin, A. J., Robertson, M. C., Hsu, M. M. y Harris, D. B., 1995. Signal coil calibration of electromagnetic seismometers. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Volumen 85, Nro.3, pp 845-850, ISSN: 0037-110.
- [37] Cheng, Y., Petrie, C., Nordick, B. y Comer, D., 2006. Multi-Bit Delta-Sigma Modulator with Two-Step Quantization and Segmented DAC. *IEEE Transaction on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, vol.53, no.9, pp.848-852.
- [38] Rajae, O., Moon, U., 2008. Enhanced Multi-bit Delta-Sigma Modulator with Two-Step Pipeline Quantizer. 978-1-4244-1684-4/08/©2008 IEEE.
- [39] Willmore, P. L., 1979. Manual of Seismological Observatory Practice. Report SE-20. Institute of Geological Science Edinburgh, Scotland. Published by World Data Center A for Solid Earth Geophysics. U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
- [40] NEIC/USGS: <https://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>, consultado 2018.
- [41] International Seismological Centre: <http://www.isc.ac.uk>, consultado 2018.
- [42] EMSC: <https://www.emsc-csem.org/>, consultado 2018.
- [43] CTBTO - Overview of the Group of Scientific Experts (GSE) for the CTBT: carnegieendowment.org/files/20090409-alewine.pdf
- [44] UNOG: Conference on Disarmament: <https://www.unog.ch/cd>, consultado 2018.
- [45] IASPEI: Commission on Seismological Observation and Interpretation: ftp://ftp.iaspei.org/pub/commissions/CSOI/CoSOI_prog4.pdf, consultado 2018.
- [46] FDSN: <http://www.fdsn.org>, consultado 2018.

- [47] ASL: Albuquerque Seismic Lab: <https://earthquake.usgs.gov/contactus/albuquerque/>, consultado 2018.
- [48] IRIS: Data Management center: <http://www.ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/>, consultado 2018.
- [49] Young, et al, 1996. A comparison of the high – frequency ($> 1\text{Hz}$) surface and subsurface noise environment at three sites in the United States, Bull. Seismol. Soc. Am., 86, 1516 - 1528.
- [50] Longuet-Higgins, M.S., 1950. A Theory of the Origin of Microseisms. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 243, No. 857 (Sep. 27, 1950), pp. 1-35. The Royal Society Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/91470>.
- [51] Ringler, A.T., Gee, L.S., Hutt, C.R. y McNamara, D.E., 2010. Temporal Variations in Global Seismic Station Ambient Noise Power Levels. Seismological Research Letters, v. 81, p. 605-613, ISSN 0895-0695.
- [52] Shearer, P., 2009. Introduction to Seismology, second edition.
- [53] Evans, J. R., Followill, C. R., Hutt, R. P., Kromer, J. M., Steim, R. L., Nigbor, A. T., Ringler y Wielandt, E., 2010. Method for calculating self-noise spectra and operating ranges for seismographic inertial sensors and recorders. Seismological Research Letters, 81, (4), 640-646, ISSN 0895-0695.
- [54] Evans, J. R., Followill, F., Hutt, F.C., Kromer, R.P., Nigbor, R.L., Ringler, A.T., Steim, J.M. y Wielandt, E., 2012. Self-Noise Spectra and Operating Ranges for Seismographic Inertial Sensors and Recorders. Seismological Research Letters, v. 83, p. 588, ISSN 0895-0695.
- [55] Nanometrics INC., 2018. Seismometer catalog, <http://www.nanometrics.ca/>, consultado 2018.
- [56] Brune, J. y Oliver, J., 1959. The seismic noise of the earth's surface. Earthquake notes, Vol. XXX, Nro. 2. Minutes of the Thirty-First Annual Meeting of the Eastern Section of the Seismological Society of America. The Pennsylvania State University.
- [57] Fantti, G., Willis, D., y Wilson, J., 1962. The Spectrum of Seismic Noise, Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 52, No. 1, pp. 113-121.
- [58] Kanai, K., Tanaka, T., Yoshizaira, S., Morishita, T., Osada, K y Suzuki, T. 1966 a. Comparative studies of earthquake motions on the ground and underground. II. Bull. Earthquake Res. Inst., 44: 609 – 643.
- [59] Kanai, K., Tanaka, T., Morishita, T., y Osada, K., 1966 b. Observation of microtremors. XI (Matsushiro earthquake swarm area) Bull. Earthquake Res. Inst., 44: 1297 – 1333.
- [60] Willmore, P. L., 1979, Word Data Center A for Solid Earth Geophysics, Report SE-20 Manual of Seismological Observatory Practice.

- [61] McNamara D.E. and Buland R.P, 2004. Ambient Noise Levels in the Continental United States, *Bulletin of the Seismological Society of America* 94 (4), DOI: 10.1785/012003001.
- [62] Custódio, S., Dias, N., Caldeira, B., Carrilho, F., Carvalho, S., Corela, C., Díaz, J., Narciso, J., Madureira, G., Matias, I. y Haberland, C., 2014. Ambient Noise Recorded by a Dense Broadband Seismic Deployment in Western Iberia. *Bulletin of the Seismological Society of America* 104 (6). Seismological Society of America. DOI: 10.1785/0120140079
- [63] Vasallo, M., Festa, G. y Bobbio, A., 2012. Seismic ambient noise analysis in Southern Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 102 (2), pp 574-586.
- [64] Rastin, J., Unsworth, C.P., Gledhill, K.R. y McNamara, D., 2012. A Detailed Noise Characterization and Sensor Evaluation of the North Island of New Zealand Using the PQLX Data Quality Control System. *Bulletin of the Seismological Society of America* 102 (1). Seismological Society of America. DOI: 10.1785/0120110064.
- [65] Castellaro, S. y Mulargia, F., 2012. A Statistical Low Noise Model of the Earth. *Seismological Research Letters* 83 (1). Seismological Society of America. DOI: 10.1785/gssrl.83.1.39
- [66] McNamara, D.E. y Boaz, R.I. (2005). Seismic Noise Analysis System Using Power Spectral Density Probability Density Functions: A Stand-Alone Software Package. Open-File Report 2005-1438, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- [67] Cooley, L.M. y Tukey, J.W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comp.* **19** (1965), 297-301. doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586.
- [68] Arango E. D. (2014): Análisis sismotectónico del territorio oriental de Cuba a partir de la integración del modelo de corteza 3D de datos gravimétricos con datos sísmológicos y geodésicos. Tesis Doctoral. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- [69] Geodevice, Beijing Gangzhen Mechanical Electronic and Technology“Co, Ltd, GEODEVICE, <http://www.geodevice.com.cn> , consultado 2018.
- [70] Chuy, T. J. (1999): Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES - IGA - CENAI. 276 p.
- [71] Chuy, T. J.; ESTIMADOS DE PELIGROSIDAD Y MICROZONACION SÍSMICA DE CUBA UTILIZANDO TERREMOTOS PERCEPTIBLES, libro SISMOS PERCEPTIBLES, PELIGRO Y VULNERABILIDAD SÍSMICA EN CUBA, Editorial Academia, Industria No. 452, esquina a San José, La Habana 10200, Cuba, ISBN 959-02-0243-8.

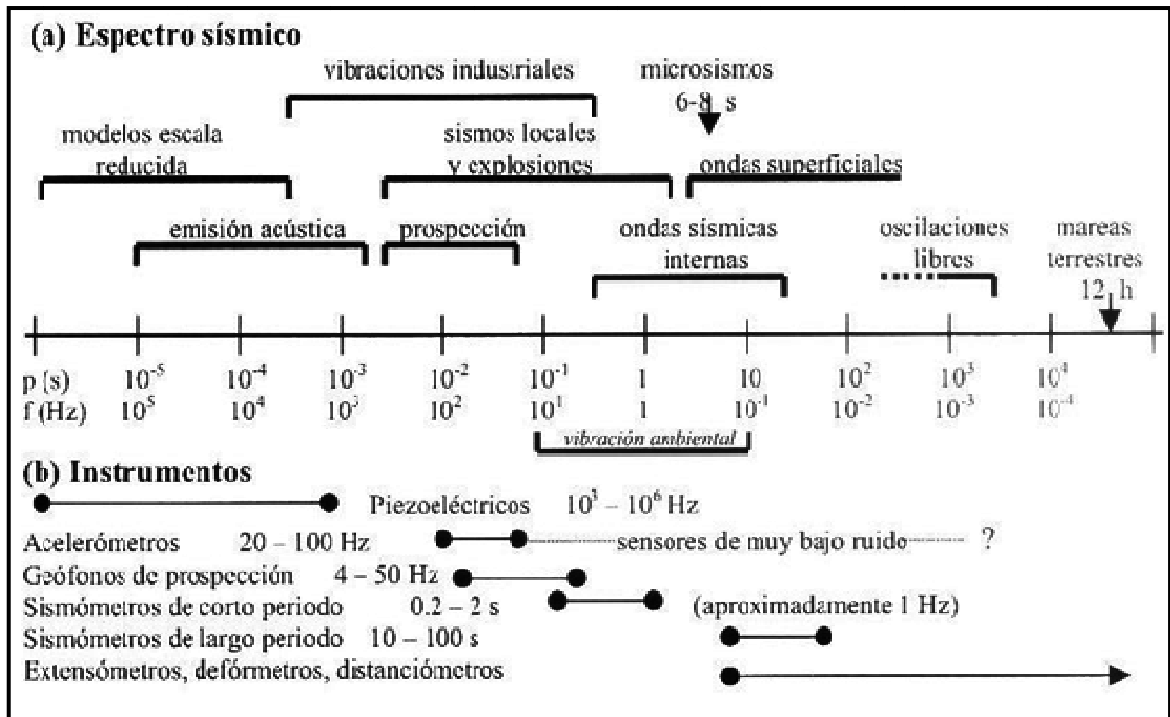
Referencias bibliográficas.

- [72] Alvarez, L.; Mijáilova, R.S.; Vorobiova; E. O.; Chuy, T.J.; Zhakirdzhánova, G.N.;Pérez, E. R.; Rodiónova, L. M.; Alvarez, H.; Mirzoev, K. M.; TERREMOTOS DE CUBA Y AREAS ALEDAÑAS, Editorial Academia, Industria No. 452, esquina a San José, La Habana 10200, Cuba, ISBN 959-02-0243-8.
- [73] Instituto de Meteorología de la República de Cuba (INSMET) <http://www.met.inf.cu/>, consultado 2018.
- [74] Romeo, G. y Braun, T., 2006. Appunti di sismometria. Cuaderni di Geofisica Nro. 46, ISSN 1590-2595.

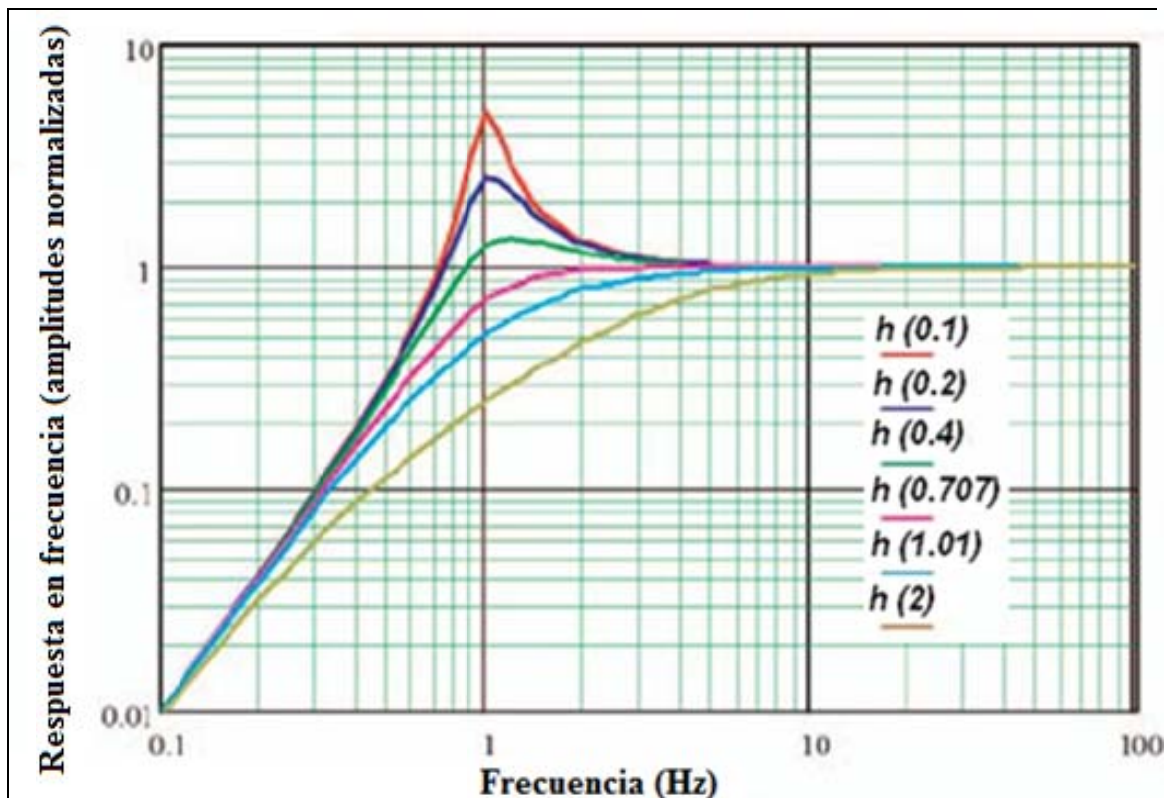
Glosario de abreviaturas

- ADC** – Analog to Digital Converter (Convertidor analógico-digital).
- A/D** – Analog/Digital Analógico/Digital.
- ADSL** -- Asymmetric Digital Subscriber Line (Línea de Abonado Digital Asimétrica).
- AH**—AH Lamont Doherty Geological Observatory (Código AH del Observatorio Geológico Lamont Doherty).
- ANSS**—Advanced National Seismic System (Sistema Sísmico Avanzado Nacional).
- ASL** -- Albuquerque Seismic Laboratory (Laboratorio sísmico de Albuquerque).
- CAIB** -- Estación sísmológica de Caibarién.
- CAMR** -- Estación sísmológica de Camarioca.
- CCCC** -- Estación sísmológica de Casorro.
- CENAI** -- Centro Nacional de Investigaciones Sísmológicas.
- CHIV** -- Estación sísmológica de Chivirico.
- CSS** -- Center for Seismic Studies (Centro de estudios sísmicos).
- DBMS** – Data Base Management System (Centro de manejo de bases de datos).
- DSP** – Digital Signal Processor (Procesador digital de señal).
- EA** -- European Agency (Agencia Europea).
- EMSC**—European Mediterranean Seismological Centre (Centro Sísmológico Europeo).
- ESA** -- Estacionaria en Sentido Amplio.
- ESSTF**-- European Standard Seismic Tape Format (Formato de cinta estándar europeo).
- FDSN** -- Federation of Digital Seismograph Networks (Federación de redes sísmográficas digitales).
- FFT** – Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier).
- FIR** -- Finite impulse response (Respuesta finita a impulso).
- GPRS** -- General Packet Radio Service (Servicio general de paquetes de radio).
- GPS** -- Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global).
- GSE**-- Group of Scientific Experts (Grupo de Expertos Científicos).
- GSN** -- Global Seismographic Network (Red Sísmográfica Global).
- GUI**—Graphical User Interface (Interfaz Gráfica de Usuario).
- HHE** – Código de la componente horizontal E-W en los canales de banda ancha.
- HHN** --Código de la componente horizontal N-S en los canales de banda ancha.
- HHZ** -- Código de la componente vertical Z en los canales de banda ancha.
- HLG** -- Estación sísmológica de Holguín.
- IASPEI** -- International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (Asociación Internacional de Sismología y Física del interior de la Tierra).
- IRIS**—Incorporated Research Institutions for Seismology (Unión de Instituciones de Investigación de Sismología).
- IRIS DMC** – IRIS Data Management Center (Centro de manejo de datos de IRIS).
- ISC** – International Seismological Centre (Centro Sísmológico Internacional).
- LMGC** -- Estación sísmológica de Las Mercedes.
- LTI**-- Lineal Time Invariant (sistema Lineal Invariante en el Tiempo).
- MASC** -- Estación sísmológica de Maisí.
- MARV**-- Estación sísmológica de Mar Verde.
- MASC** -- Estación sísmológica de Maisí.
- MARV**-- Estación sísmológica de Mar Verde.
- MGV** -- Estación sísmológica de Manicaragua.
- MSOP** – Manual of Seismological Observatory Practice (Manual práctico de observatorios sísmológicos).
- MySQL**—My Structured Query Language (Lenguaje de base de datos)
- NEIC**—National Earthquake Information Center (Centro Nacional de Información sobre Terremotos).
- NHNM** – New High Noise Model (Nuevo modelo de alto ruido).
- NLNM** – New Low Noise Model (Nuevo modelo de bajo ruido).
- NMSOP** – New Manual of Seismological Observatory (Nuevo manual práctico de observatorios sísmológicos).
- NMDO** -- Estación sísmológica de Nuevo Mundo.
- PDF** – Probability Density Function (Función de Densidad de Probabilidad).
- PQLX** – Passcall Quick Look eXtended (Codigo Passcall extendido).
- PSD** – Power Spectral Density (Densidad Espectral de Potencia).
- QMBU** -- Estación sísmológica de Quimbuelo.
- TCP/IP** --Transmission Control Protocol/Internet Protocol (Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet).
- TF** – Telegraphic Format (Formato telegráfico).
- THD** – Total Harmonic Distortion (Distorsión armónica total).
- RCC** -- Estación sísmológica de Río Carpintero.
- RMS** – Root Mean Square (Raíz cuadrática media).
- SAC** – Seismic Analysis Code (Código de análisis de datos).
- SEED** -- Standard for the Exchange of Earthquake Data (Estándar para intercambio de datos sísmológicos).
- SEISAN** – Seismological analysis (Análisis sísmológico).
- SOR**- Estación sísmológica Soroa.
- SNR** – Signal to Noise Ratio (Relación Señal Ruido).
- SSN** – Servicio Sísmológico Nacional.
- USNSN** -- U.S. National Seismograph Network (Red Sísmográfica Nacional de Estados Unidos).

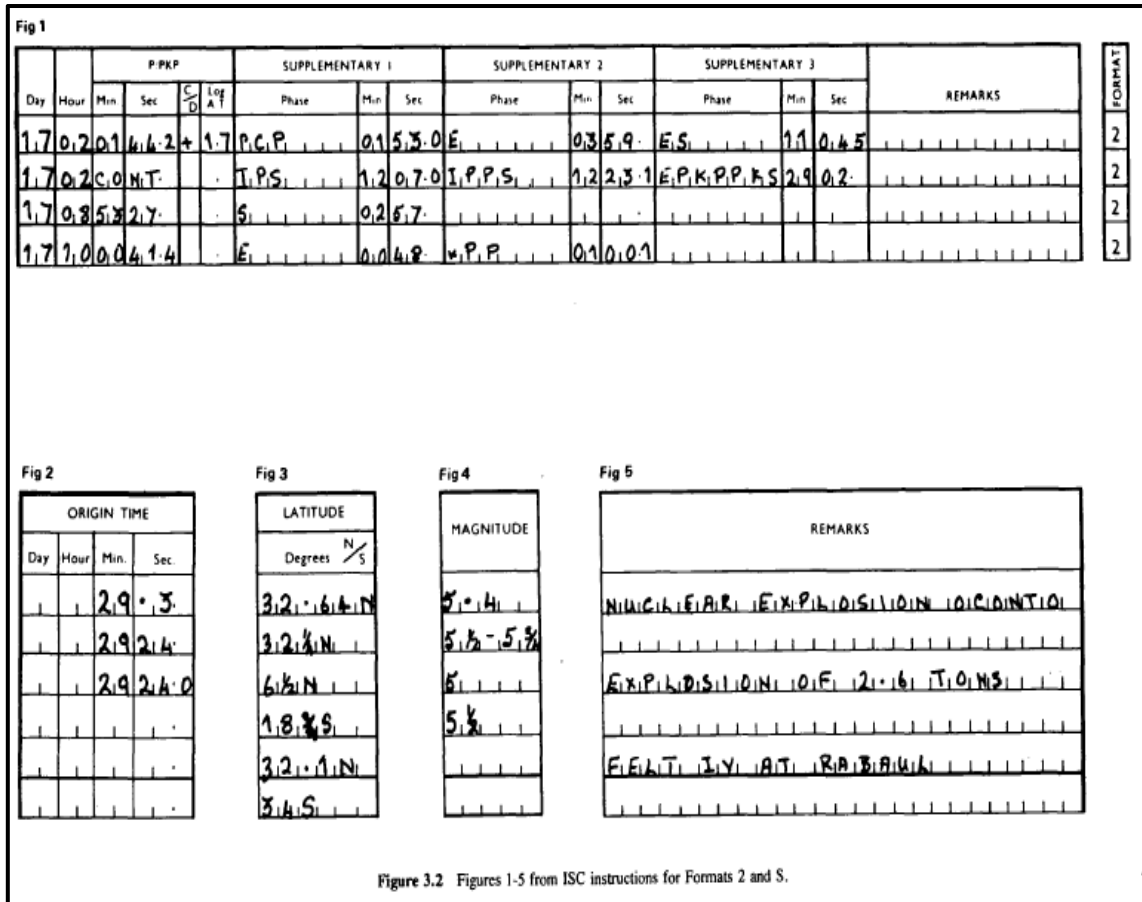
ANEXOS A



AnexoA1: Espectro de la señal sísmica y principales instrumentos para su detección [30]



AnexoA2: Respuesta en frecuencia de un péndulo físico [74]

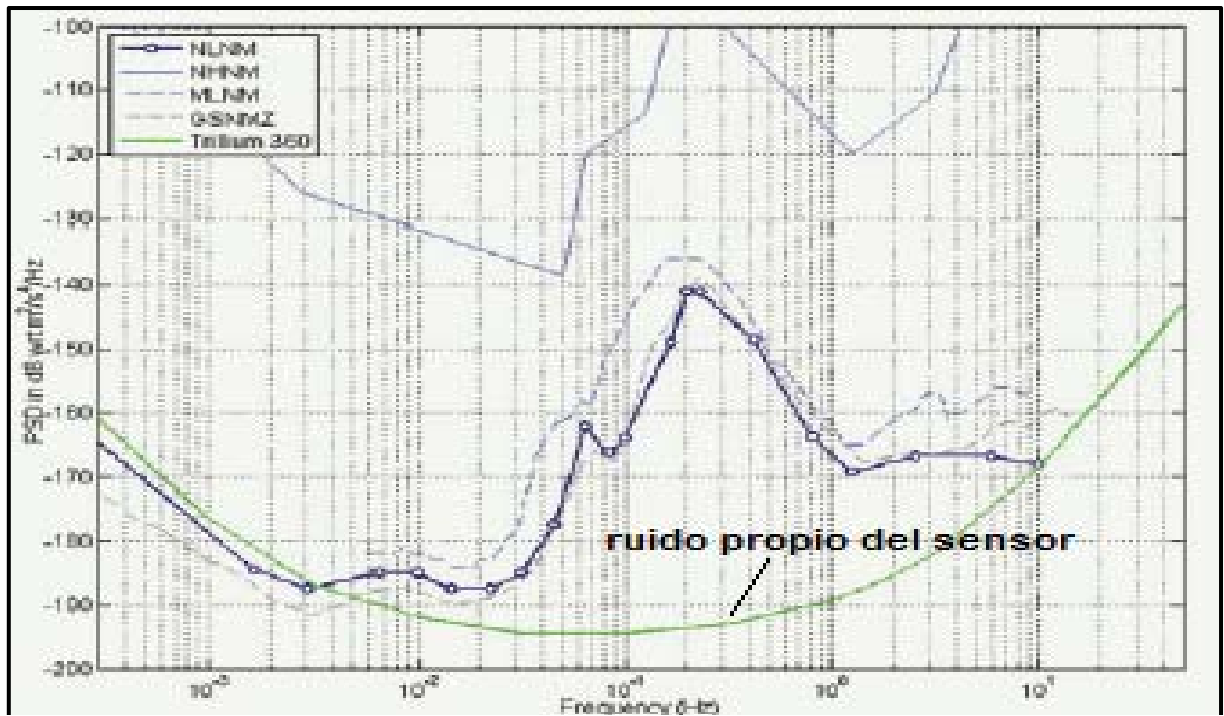


Anexo A3: Ejemplo de formato telegráfico [39]

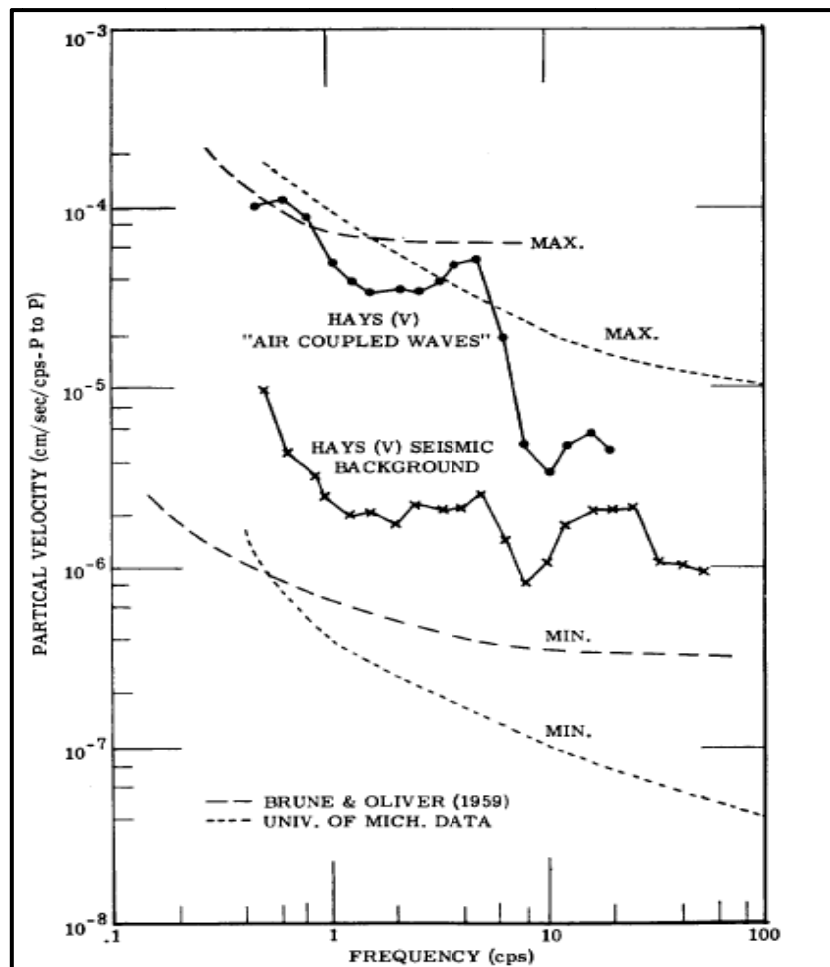
```

BEGIN GSE2.0
MSG_TYPE DATA
MSG_ID 1900/10/19_1711 ISR_NDC
DATA_TYPE ORIGIN GSE2.0
EVENT 00000001
Date      Time      Latitude Longitude  Depth  Ndef Nsta Gap  Mag1 N  Mag2 N
rms  OT_Error  Smajor Sminor Az      Err  mdist  Mdist  Err      Err      Err
1996/06/06 06:48:30.4  62.6350  5.0470  15.0  25  13 267  ML 2.9  8
1.40 +- 5.92  0.0  0.0  0 +- 31.8  1.04  4.84 +-0.3
Sta  Dist  EvAz  Phase  Date  Time  TRes  Azim  AzRes  Slow  SRes  Def  SNR
Amp  Per  Mag1  Mag2  Arr ID
FOO  1.04 180.0 mc P 1996/06/06 06:48:48.5 -0.1 T
FOO  1.04 180.0 m SG 1996/06/06 06:49:02.7 0.7 T
FOO  1.04 180.0 m 1996/06/06 06:49:02.9
426.4 0.30 ML 3.2 00000003 (from previous line)
MOL  1.16 92.0 mc P 1996/06/06 06:48:50.0 -0.3 T
MOL  1.16 92.0 mc PG 1996/06/06 06:48:50.9 0.4 T
    
```

Anexo A4: Ejemplo de formato GSE [44]



Anexo A5: Gráfico de la curva de ruido propio del sensor comparado con los modelos de Peterson [55]



Anexo A6: Modelos de ruido obtenidos por Frantti comparados con Brune y Oliver [56]

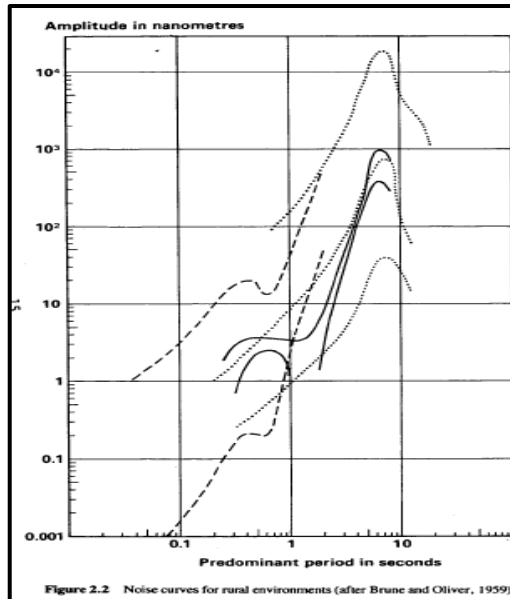


Figure 2.2 Noise curves for rural environments (after Brune and Oliver, 1959).

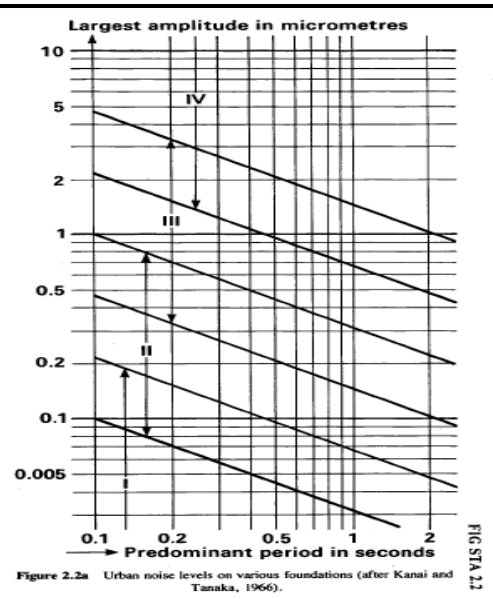


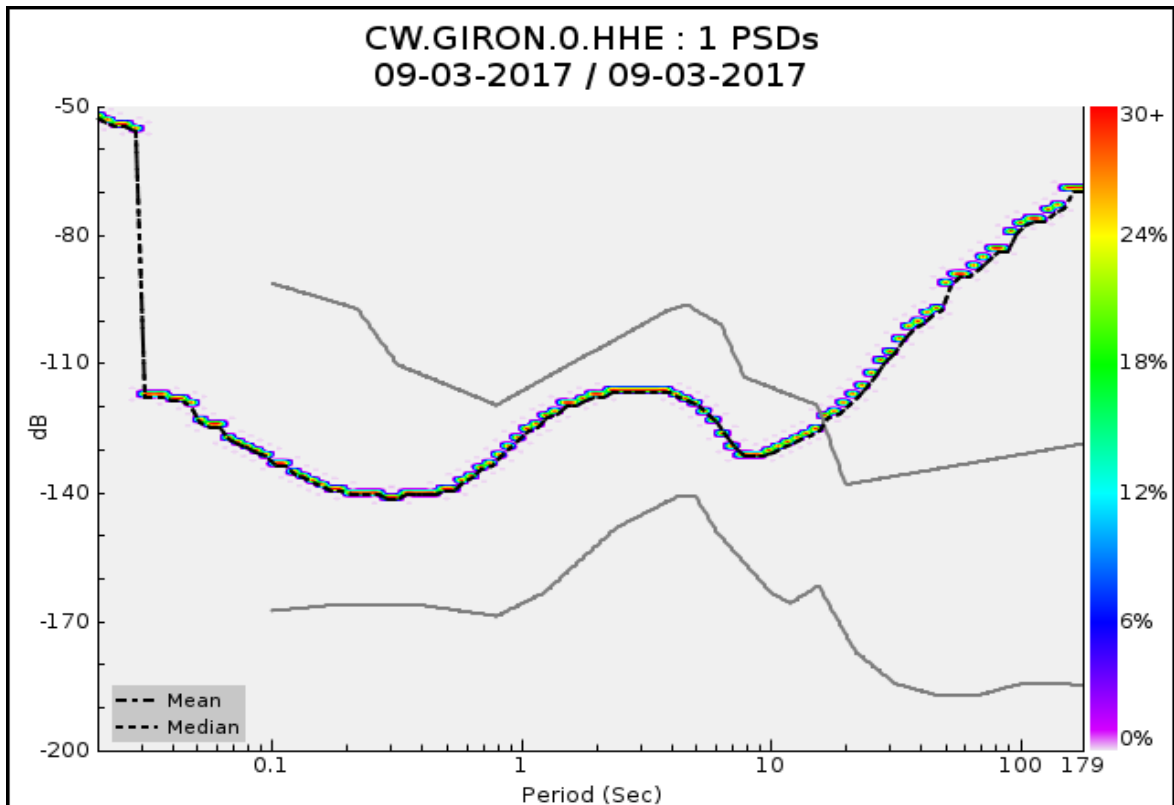
Figure 2.2a Urban noise levels on various foundations (after Kanai and Tanaka, 1966).

Anexo A7: Modelos de ruido, a la izquierda modelo de Brune y Oliver, a la derecha el modelo de Kanai y Tanaka [59]

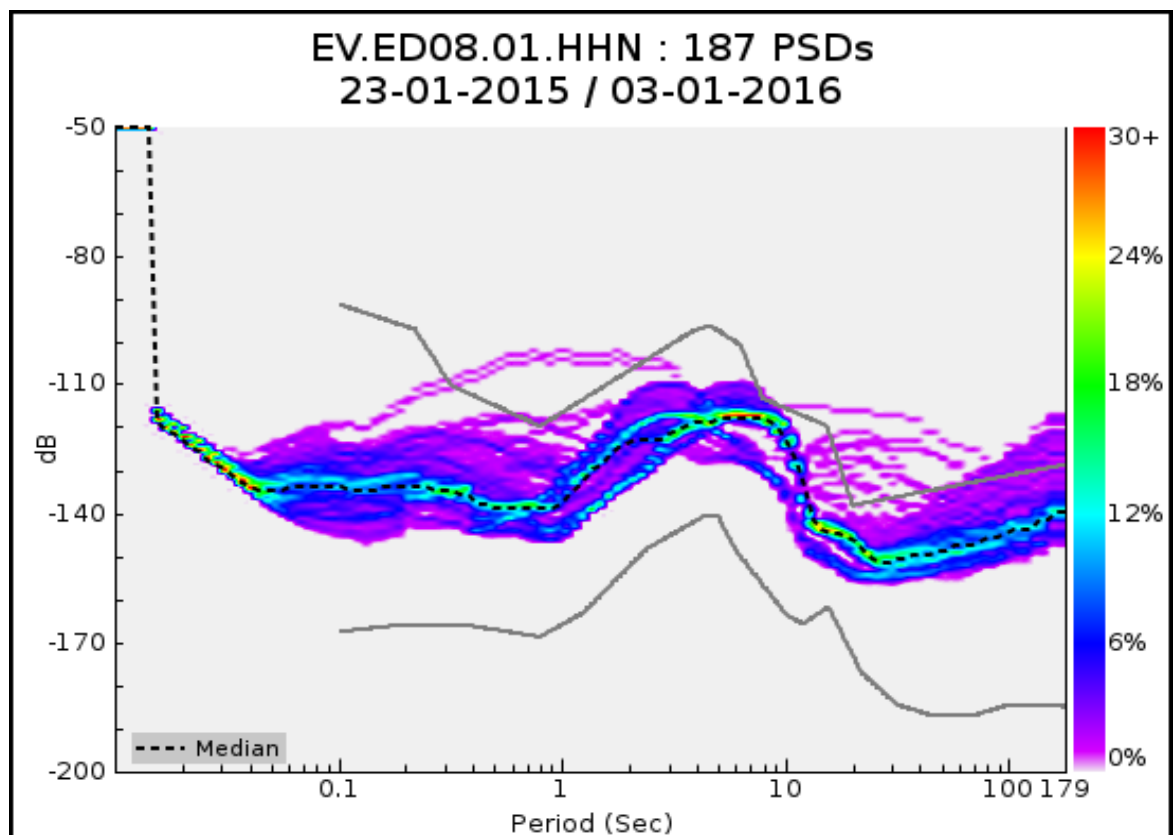
Source of Disturbances	Seismometer on Hard Massive Rock, Granite, Quartzite, etc.			Seismometer on Hard Clay Hardpan, etc.		
	A	B	C	A	B	C
	km	km	km	km	km	km
1. Oceans a. with coastal mountain systems as Pacific North and South America	300	50	1	300	50	1
b. with broad central and coastal plains as eastern North and South America	1000	200	10	1000	200	20
2. Inland seas, bays, and large lakes Great Lakes	a 150	25	1	150	25	1
b 500	100	5	500	100	5	
3. High waterfalls, cataracts or excessive flow over Large dams, e.g. Niagara, Grand Coulee Dam	c 40	10	5	50	15	5
d 60	15	5	100	25	10	
4. Transcontinental oil or gas pipe lines, etc.	c 20	10	5	30	15	5
d 100	30	10	100	30	10	
5. Small lakes	c 20	10	1	20	10	1
d 50	15	1	50	15	5	
6. Reciprocating power plant machinery, rockcrushers, heavy machinery, etc.	c 15	3	1	20	5	2
d 25	5	1	40	15	3	
7. Low waterfalls, rapids of a large river, intermittent flow over large dams	c 5	2	0	15	5	1
d 15	3	1	25	8	2	
8. Railways, if frequent operation	c 6	3	1	10	5	1
d 15	5	1	20	10	1	
9. Airports and airways heavy traffic	c 6	3	1	6	3	1
			metres			
10. Non-reciprocating power plant machinery, balanced industrial machinery	c 2	0.5	100	10	4	1
d 4	1	200	15	6	1	
11. Busy highway nearly continuous traffic or mechanized farm area	1	metres	100	6	1	metres
	metres	300				500
12. Graded country roads, high buildings	300	200	50	2	1	500
13. Low buildings and high trees, wind charger for seismograph batteries if coupled to ground	100	30	10	metres	metres	50
				300	100	
14. High fence, low trees, large rocks, high bushes	50	25	5	100	50	10
15. Wind charger for seismograph batteries if decoupled from ground	30	15	5	60	30	10

a. as in 1a
b. as in 1b
c. Source and seismometer on widely different formations, or that mountain ranges or alluvial valleys intervene.
d. Source and seismometer on same formation and with no intervening alluvial valley or mountain range.
A Gain for 1 eps 200,000 or more; B Gain 50,000 to 150,000; C Less than 25,000
Note: These classes A,B,C differ from the classes introduced in section INST. 1.1.

Anexo A8: Tabla de distancias recomendadas entre las estaciones sísmicas y las fuentes de ruido [60]



AnexoA9: Gráfico de la PSD de aceleración en dB en la búsqueda del sitio de instalación de la estación Girón (Fondos del CENAIIS, 2018)

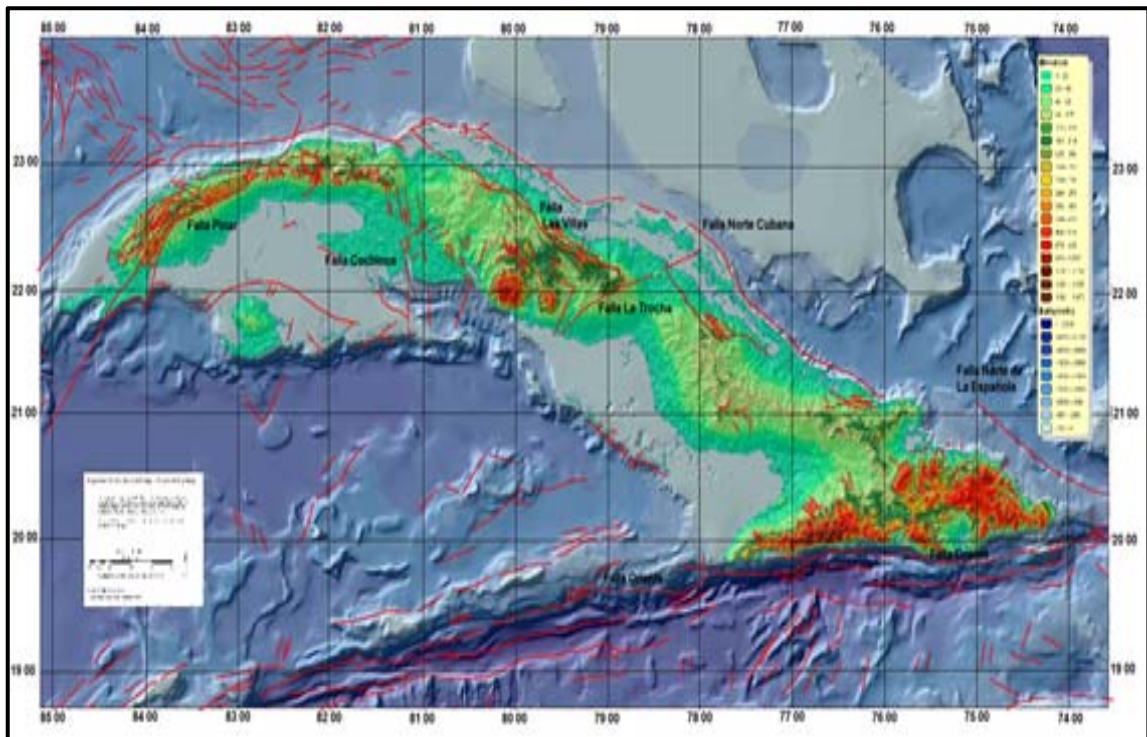


Anexo A10: Gráfico de PDF de una estación de pozo en la red del norte de Italia (OGS, 2018)

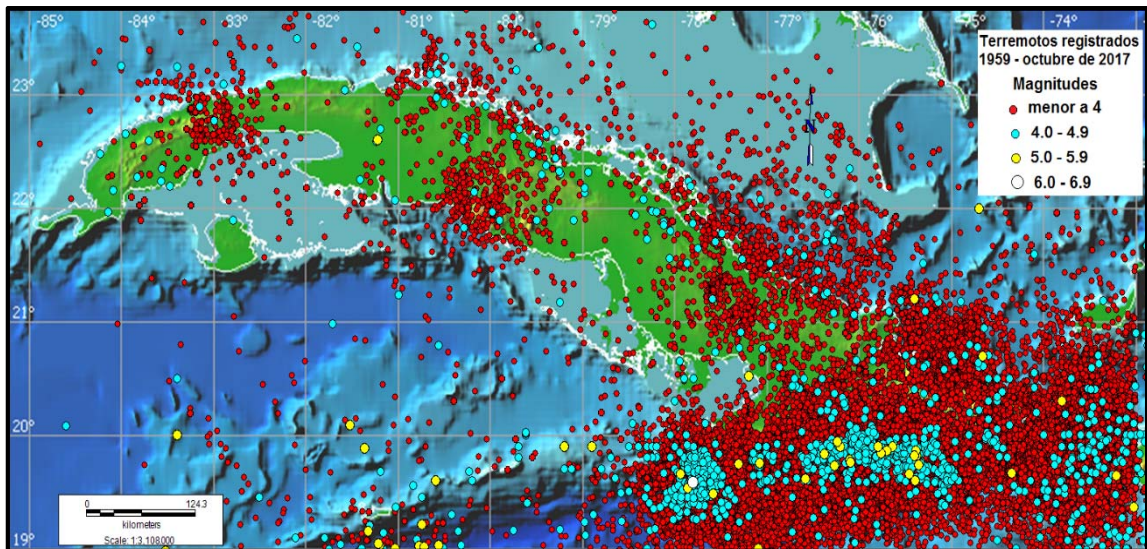
ANEXOS B



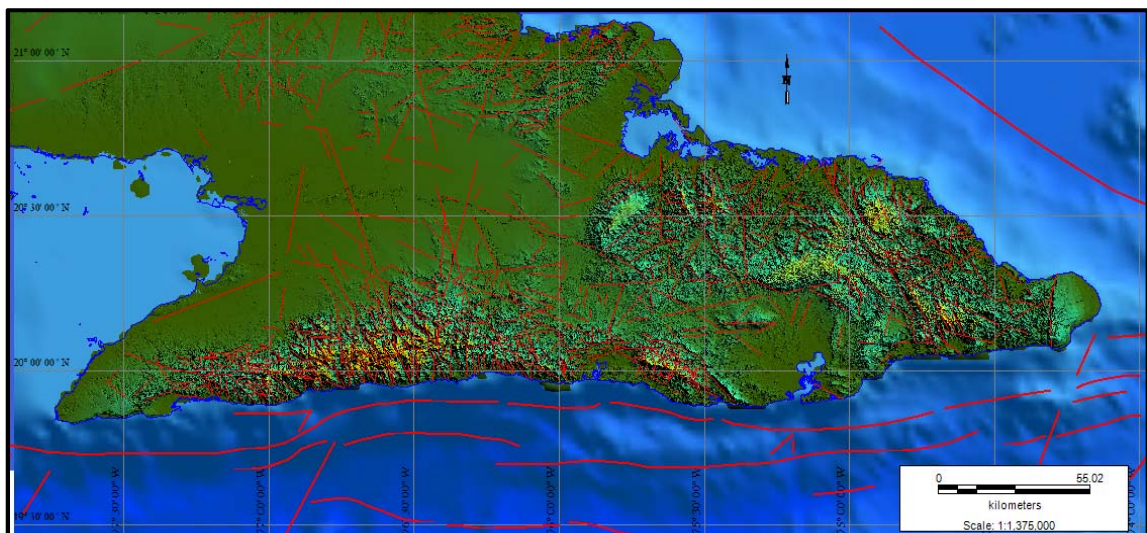
Anexo B1: Fotografía de los emplazamientos de algunas estaciones del SSN cubano



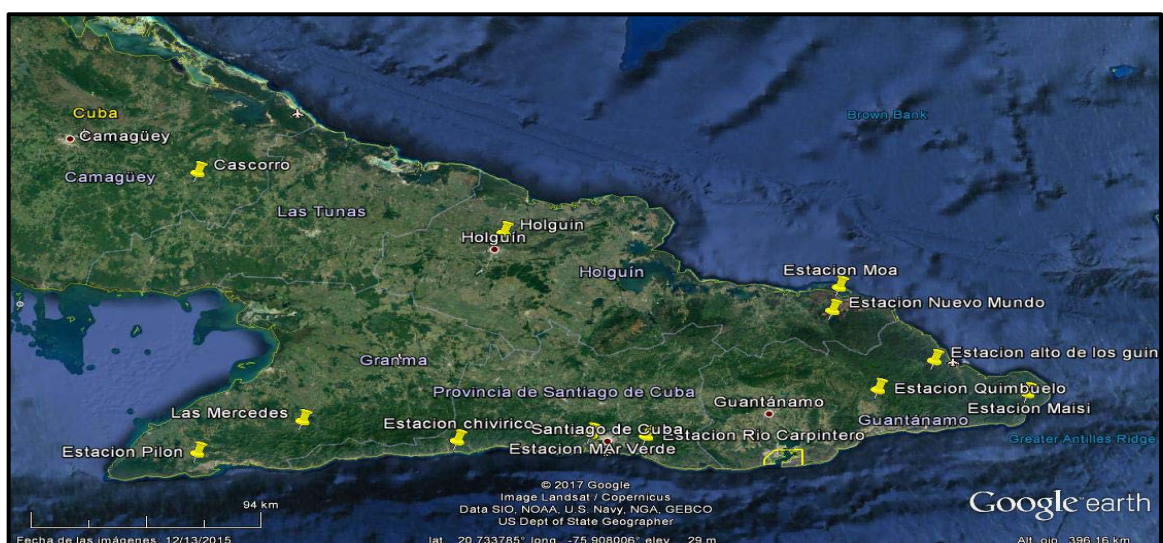
Anexo B2: Mapa de los principales sistemas de fallas que afectan a Cuba [70]



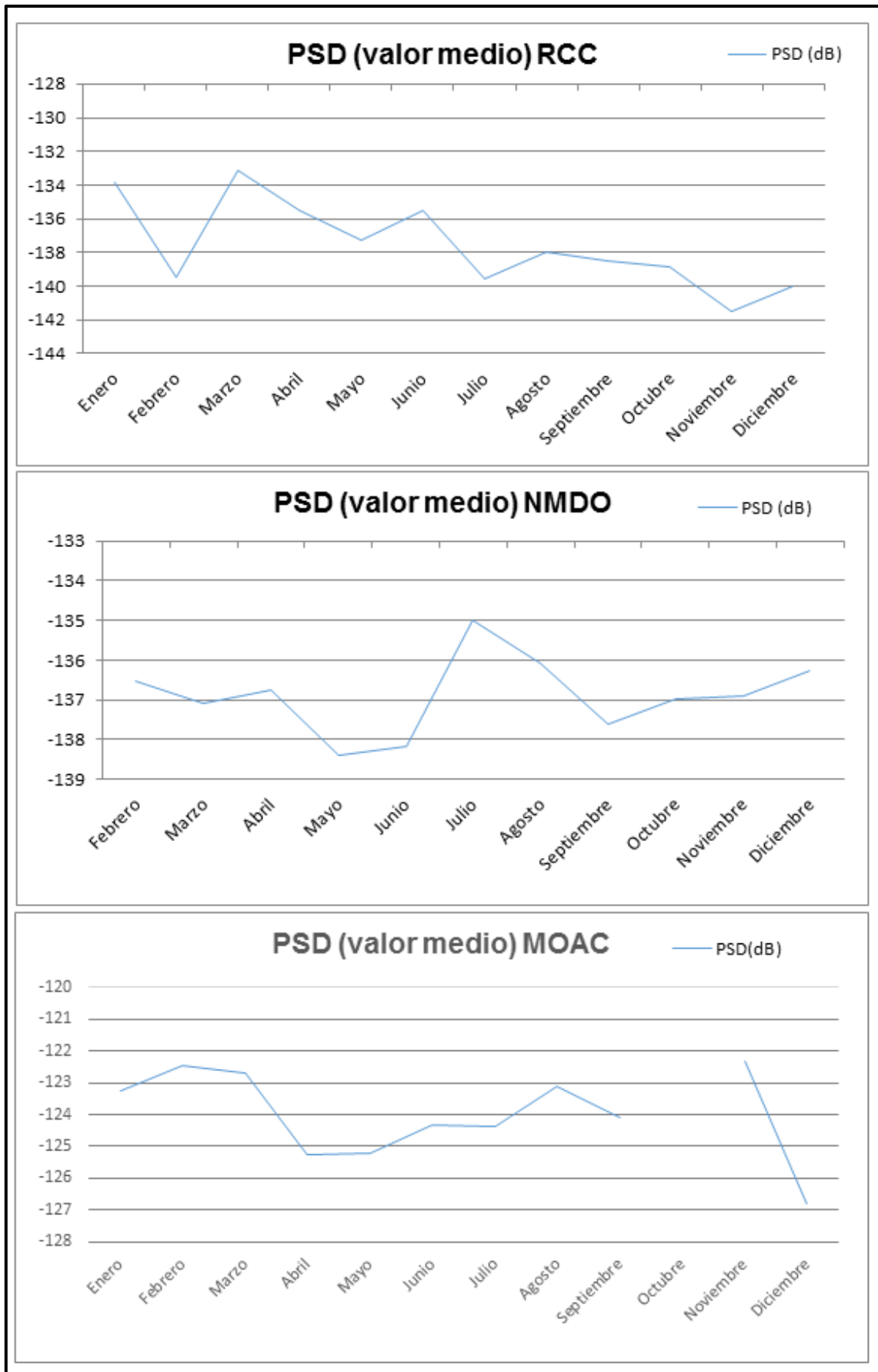
Anexo B3: Mapa de epicentros de terremotos 1959~2017 [71]



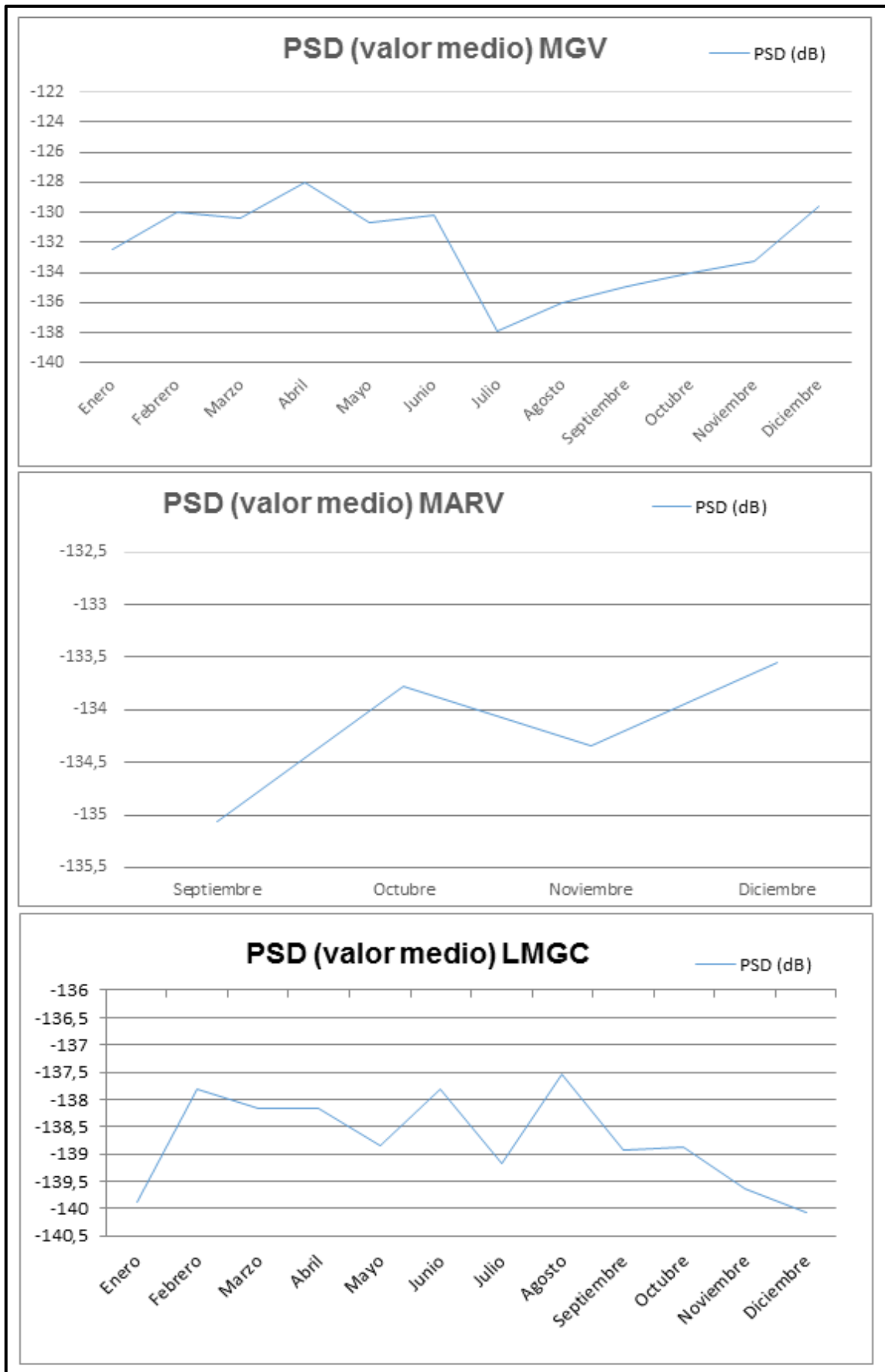
Anexo B4: Mapa de los sistemas de fallas en la zona oriental de Cuba [75]



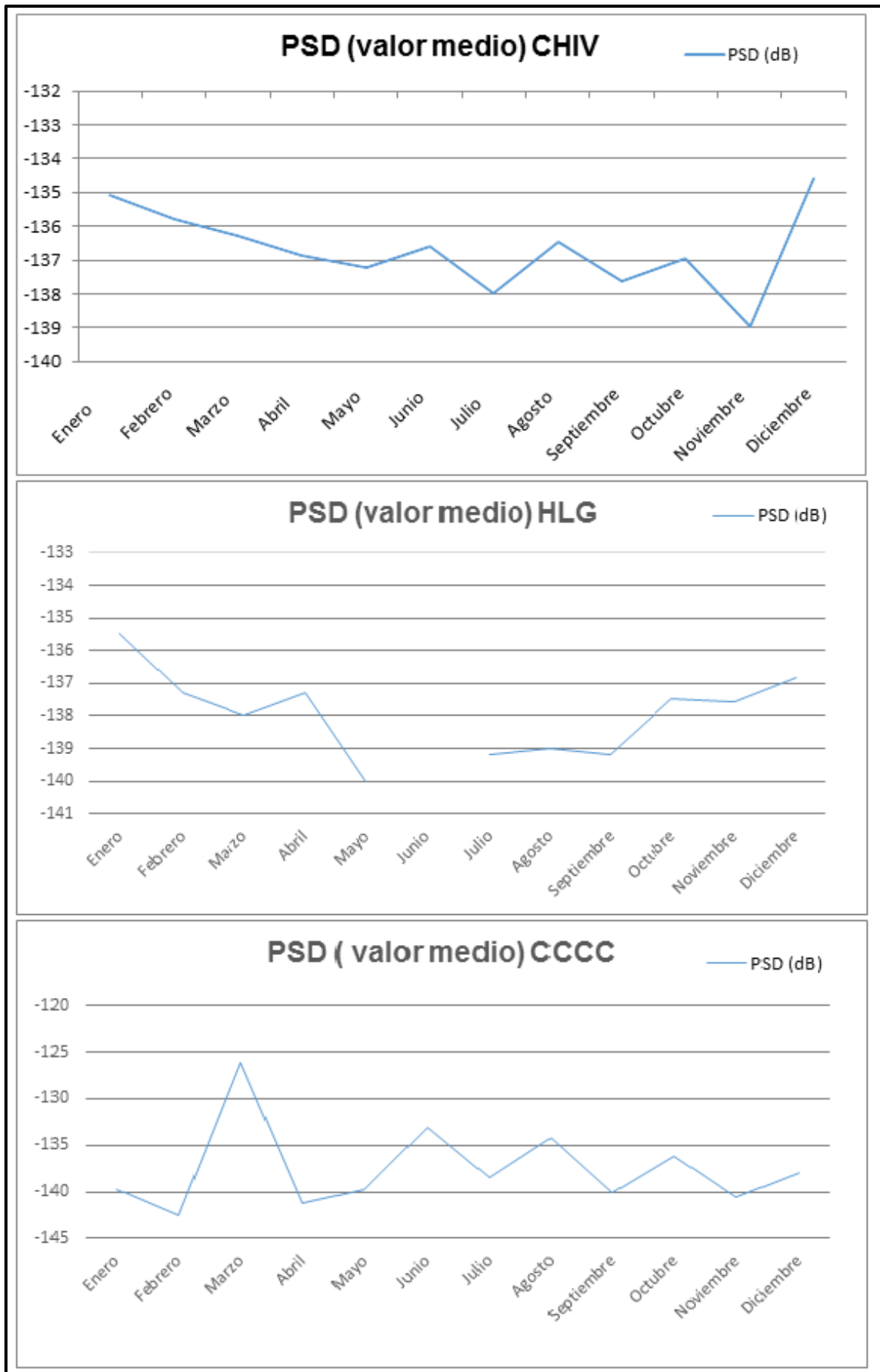
Anexo B5: Mapa de estaciones usadas en el estudio propuesto [75]



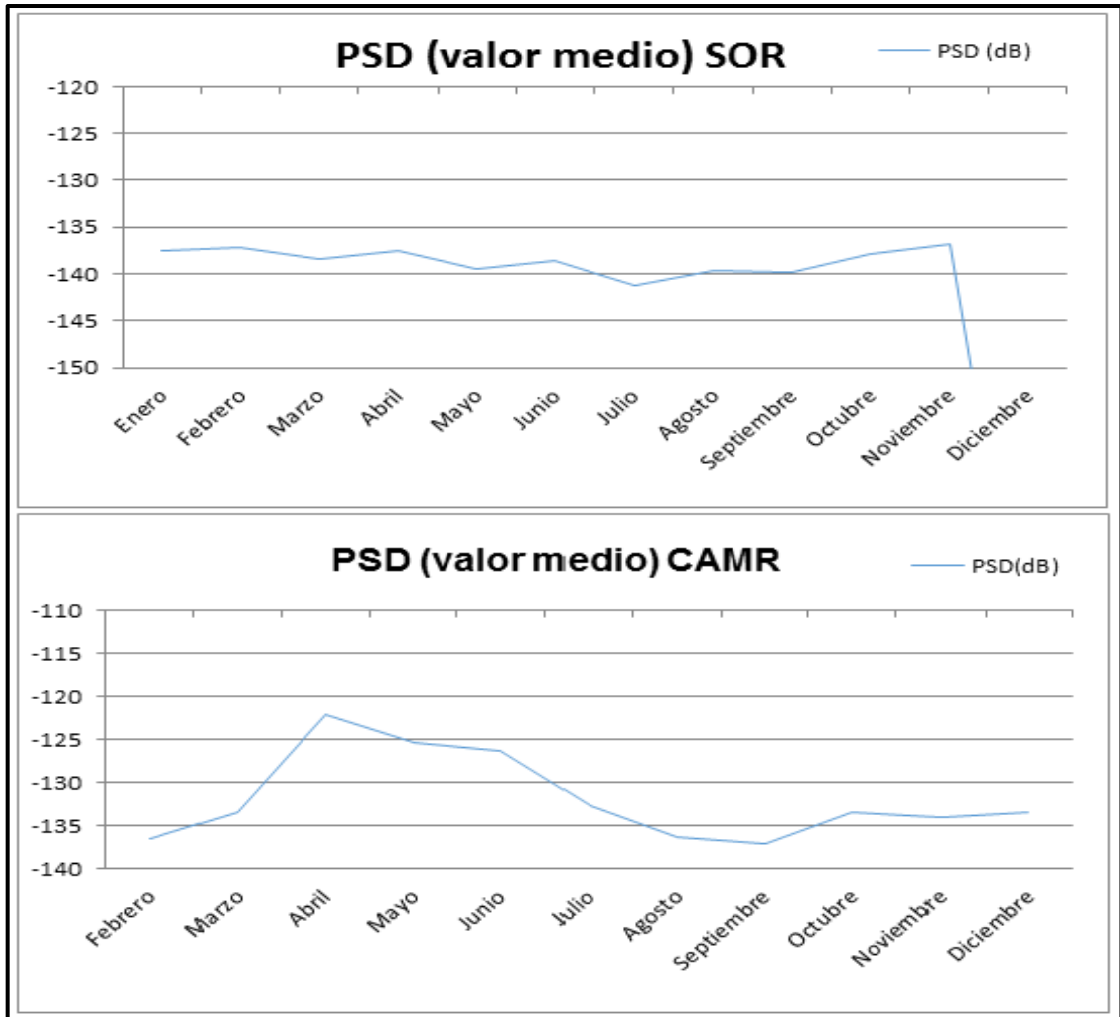
Anexo B6: Valores medios de las PSD para las estaciones RCC, NMDO y MOAC



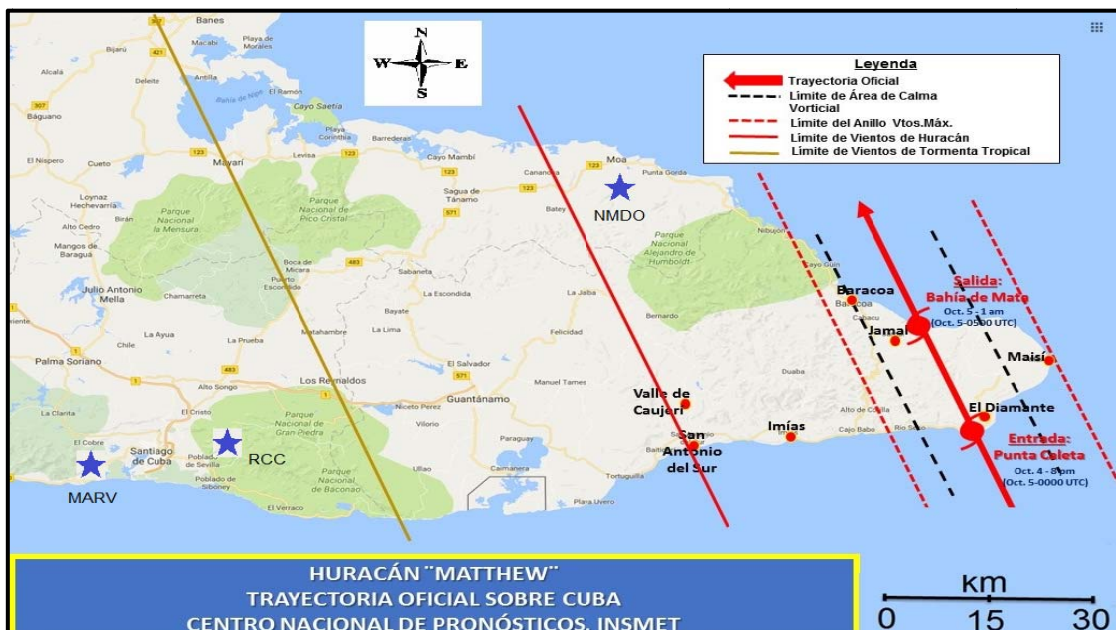
Anexo B7: Valores medios de las PSD para las estaciones MGV, MARV y LMGC



Anexo B8: Valores medios de las PSD para las estaciones CHIV, HLG y CCCC



Anexo B9: Valores medios de las PSD para las estaciones SOR y CAMR



Anexo B10: Mapa de la trayectoria del huracán Matthew [73]