

ÍNDICE

ÍNDICE	1
RESUMEN	3
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.	4
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES MATEMÁTICOS Y FÍSICOS.....	7
2.1 Análisis de Fourier.....	7
2.1.1 Series de Fourier.....	7
2.1.2 Transformada de Fourier continua.....	8
2.1.3 Transformada de Fourier discreta.....	9
2.1.4 Espectro de potencia de una señal discreta.....	10
2.2 Decibeles.....	11
2.3 Ondas superficiales	12
2.3.1 Velocidad de Fase y Grupo.....	14
2.3.2 Dispersión.....	15
2.4 Resonancia	16
CAPÍTULO 3. CURVAS DE RUIDO SÍSMICO.	17
3.1 Ruido vs Señal.....	17
3.2 Historia de las curvas de ruido sísmico	17
3.3 Obtención de las curvas de ruido.....	20
3.4 Variaciones y fuentes del ruido sísmico.....	22
3.4.1 Ruido Meteorológico.....	23
3.4.2 Ruido cultural.....	24
3.4.3 Ruido inherente del sensor	24
CAPÍTULO 4. RUIDO EN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS DE MASE.	26
4.1 Proyecto MASE.....	26
4.2 Niveles de ruido.....	29
4.2.1. Observaciones de las variaciones y fuentes.....	30
4.2.2. Propagación en la Línea MASE	36

CAPÍTULO 5. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.	43
REFERENCIAS.....	45
APENDICE 1. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES DE LAS CURVAS DE DENSIDAD DE POTENCIA.	47
APÉNDICE 2. CURVAS DE MAGNITUD MÍNIMA.	81
APÉNDICE 3. CORRECCIÓN POR INSTRUMENTO.	85

Resumen

MASE (*Meso-American Subduction Experiment*) es un proyecto que tiene como objetivo principal crear un modelo de la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa de Norte América. Para este fin se instalaron 100 estaciones de banda ancha, tomando 100 muestras por segundo ($\sim 3 \times 10^{11}$ por año), a lo largo de una línea que va desde Acapulco, Guerrero, hasta Tempoal, Veracruz, siendo el Distrito Federal el punto medio de esta línea. En particular, el objetivo de este trabajo de tesis es caracterizar el nivel de ruido a diferentes frecuencias en las estaciones del proyecto MASE por medio del análisis de microtemores, para poder evaluar la calidad de la señal y presentar un catálogo del ruido sísmico de fondo de estas estaciones. Para lograrlo se analizó un día de datos por mes para todas las estaciones, para los 2 años y 5 meses que duró el experimento. Observamos que la mayoría de las estaciones tienen niveles de ruidos dentro de los propuestos por Peterson (1993). Aunque algunas de ellas muestran niveles de ruido considerables en rangos de frecuencia altas (>1 Hz), esto es principalmente una consecuencia de los criterios usados en la selección de sitio: su localización con respecto a la línea, la seguridad del equipo, el acceso a la estación y la línea de la vista (para éstos que transmitieron en tiempo real), los cuales tenían una prioridad más alta que la calidad del sitio mismo. En el análisis se observan picos en las curvas entre 6 y 7 s de periodo, las cuales se atribuyen al golpe de las olas sobre la costa, los cuales son más evidentes en las estaciones que están cercanas a ésta. También se analizó el incremento del ruido de alta frecuencia, así como la diferencia de este ruido entre el día y la noche en las estaciones que se encuentran dentro de las ciudades o cercanas a vías transitadas por vehículos o dentro de edificios públicos (escuelas, instituciones, etc.). Se encontraron algunas diferencias en las intensidades y las frecuencias de las señales en diferentes épocas del año, como los son la temporada de huracanes, el invierno, el verano, etc. Lo que se pretende con estos resultados es que otros estudios puedan considerar los efectos del ruido en el sitio para sus objetivos particulares, pudiendo seleccionar estaciones y/o señales óptimas. También se calculó la magnitud local (M_L) mínima que se podía encontrar con las estaciones localizadas en la Ciudad de México y parte del área metropolitana (consideradas las más ruidosas por su ubicación), esto con el propósito de ver qué tanto afecta el ruido cultural a los registros de eventos locales.

CAPÍTULO 1. Introducción.

La superficie de la Tierra se encuentra en continuo movimiento, el cual puede ser registrado con un sismómetro. Los registros obtenidos con estos instrumentos pueden ir desde eventos telesísmicos localizados a miles de kilómetros de distancia, hasta eventos regionales o locales, y los orígenes pueden ser tectónicos, volcánicos o microsismos generados por el ruido natural de fondo.

El *Meso-American Subduction Experiment* (MASE) es un proyecto que tiene como objetivo principal crear un modelo dinámico de la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa de Norteamérica. En este trabajo de tesis se pretende caracterizar el nivel de ruido a diferentes frecuencias de las estaciones de banda ancha de proyecto MASE, por medio del análisis de microsismos.

La utilidad de los datos sísmicos es mucho mayor cuando los niveles de ruido son bajos; sin embargo, es posible maximizar ésta con una buena comprensión y cuantificación del ruido sísmico, siendo necesario realizar el análisis de los niveles de ruido sísmico en estaciones de registro.

Los microsismos fueron estudiados por primera vez por Timoteo Bertelli en 1878, quien instaló un péndulo y realizó observaciones durante algunos años, registrando las oscilaciones del péndulo durante determinadas horas del día. De sus estudios, Bertelli encontró que las variaciones en las oscilaciones coincidían con telesismos y variaciones de la presión atmosférica, aunque también atribuía algunas de estas variaciones en las oscilaciones a la acción del viento o a las mareas, además de notar una ligera diferencia entre las intensidades de estas variaciones, las cuales aumentaban durante el invierno y disminuían durante el verano. A este tipo de mediciones se les llamó observaciones tronométricas y pronto se realizaron observaciones en varias partes del mundo (Moreno y Alfaro, 2000).

Por su origen, los microsismos han sido utilizados para predecir los fenómenos meteorológicos inestables que los generan, tales como ciclones y tormentas (Ramírez, 1939). Pero no fue sino hasta mediados del siglo XX, con el mejoramiento de la sensibilidad de los instrumentos de medición sísmica, que el estudio de los microsismos tomó una gran importancia. De estos estudios surgieron varias teorías sobre el origen de los microsismos, pero solo dos de éstas tomaron gran fuerza.

La primera asegura que la fuente de estos microsismos está dada por los cambios en las presiones atmosféricas (Whipple y Lee, 1935). La segunda propone que los microsismos son originados por el rompimiento de las olas a lo largo de las costas y que es probable que algún estrato entre en resonancia por la transmisión de energía de las olas del mar (Zanon, 1938).

Con el paso del tiempo se logró demostrar que las ondas de los microsismos no son ondas estacionarias y que es posible determinar la dirección de la fuente del ruido cuando ésta se encuentra lo suficientemente cercana a las estaciones (Ramírez, 1939).

Las fuentes de ruido sísmico son varias, la más común es producto de la actividad humana, principalmente generada por el tránsito de vehículos y el uso de maquinaria pesada. Este tipo de ruido se propaga como ondas superficiales de alta frecuencia (1-10 Hz ó 1-0.1 s) que se atenúan mucho en pocos kilómetros de distancia; además, presenta una enorme variación diurna y algunas frecuencias características que dependen de la fuente del ruido (Ej. frecuencia de rotación de un automotor).

Otra fuente importante de ruido proviene de vibraciones ambientales, ya que los objetos se mueven respondiendo a la acción del viento y al acoplamiento entre objetos grandes, tales como torres, árboles y postes con el terreno, lo cual se presenta como ruido de período largo. Como fuentes adicionales en este tipo de ruido pueden incluirse las corrientes de agua, olas y actividad volcánica. Las fluctuaciones en la presión atmosférica, cambios de temperatura, expansión y contracción del concreto donde se encuentra el instrumento pueden también ser causantes de ruido de período largo. Por otro lado, el mismo instrumento puede contribuir con ruido electrónico, originado por corrientes de convección dentro del sensor debido a la disipación de calor, relajación de la tensión en los resortes y metal del equipo, así como dilatación y contracción del equipo debido al calor. En ocasiones, el ruido de fondo en una estación de mediciones sísmicas puede enmascarar cierto tipo de registros de baja intensidad y que son de interés para algunos estudios, de ahí que sea importante el caracterizar el ruido y los niveles de éste dentro de una estación, ya que conociendo esto, la señal puede ser tratada para minimizar su efecto.

Jon Peterson (1993) obtuvo unas curvas de densidad espectral de potencia de aceleración (PSD, por sus siglas en inglés) a partir de una compilación del ruido registrado en 75 estaciones digitales distribuidas por todo el mundo de la Red Global Sismográfica (*Global Seismographic Network*, GSN). Estas curvas son

actualmente la base para el cálculo de los límites de niveles de ruido en una estación sismológica.

Para esta tesis se calcularon las curvas de ruido para todas y cada una de las estaciones del experimento MASE, para después poder compararlas con las curvas de ruido alto y bajo propuestas por Peterson (1993) y con el conocimiento del sitio y tipo de instalación utilizados poder caracterizar el ruido sísmico de fondo y a su vez observar los niveles de ruido en toda la línea MASE. El cálculo del análisis se presenta en los capítulos 3 y 4.

Comenzaremos en el Capítulo 2 con una breve descripción de las herramientas matemáticas necesarias para obtener las curvas de ruido y algunos conceptos básicos de sismología para poder interpretarlas.

CAPÍTULO 2. Antecedentes matemáticos y físicos.

Para poder caracterizar el ruido sísmico es indispensable el cálculo de espectros de potencia de las señales; y matemáticamente, el análisis espectral está relacionado con una herramienta llamada transformada de Fourier o análisis de Fourier, siendo un proceso que cuantifica las diversas intensidades de cada frecuencia. Dicho análisis puede llevarse a cabo para pequeños intervalos de tiempo, o menos frecuentemente para intervalos largos.

Además, la transformada de Fourier de una función no sólo permite hacer una descomposición espectral de los formantes de una onda o señal, sino que con el espectro obtenido se puede incluso reconstruir la función original mediante la transformada inversa.

En las representaciones gráficas, frecuentemente sólo se representa el módulo al cuadrado de ese número, y el gráfico resultante se conoce como espectro de potencia o densidad espectral de potencia.

Por otro lado, como se discutirá más adelante (Capítulo 3), el ruido sísmico a analizar está compuesto por ondas superficiales de Rayleigh. Por lo tanto, este capítulo también abarca teoría básica sobre ondas superficiales. Todo esto con el objetivo de facilitar la comprensión de los capítulos posteriores.

2.1 *Análisis de Fourier.*

El análisis de Fourier es una herramienta fundamental para la representación de una señal. Es utilizado para el análisis de funciones periódicas a través de su descomposición en sumas de funciones cosenoidales infinitesimales mucho más simples. En palabras más sencillas el análisis de Fourier sirve para pasar una señal del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias.

2.1.1 Series de Fourier.

La forma en que la serie de Fourier reconstruye a una función es a través de la suma de funciones cosenoidales. Estas funciones tienen diferentes amplitudes y

periodos, las cuales al sumarse con diferentes ángulos de fase van reconstruyendo a la función original.

Dada una función $f(t)$, ésta puede ser aproximada mediante

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^N A_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + B_k \sin \frac{2\pi kt}{T}, \quad (2.1)$$

donde $\frac{1}{2}A_k - i\frac{1}{2}B_k = D_k$ y D_k representa un coeficiente complejo de una función imaginaria, ya que la aproximación se hace por medio de funciones complejas ortogonales.

2.1.2 Transformada de Fourier continua

Básicamente la transformada de Fourier se encarga de aplicar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, de donde se puede realizar su anti-transformada y volver al dominio temporal. Para poder hacer eso, la transformada no solamente contiene información sobre la intensidad de determinada frecuencia, sino también sobre su fase. El trabajo con la señal en frecuencia permite por un lado obtener información valiosa sobre algunas características de la señal misma y por otro permite ser filtrada de una manera directa para utilizar sólo el rango de frecuencias deseado.

Definición.

Sea $f(t)$ una función del tiempo, t , continua por partes en $[a, b], \forall a, b > 0$. La *transformada de Fourier* de $f(t)$ se define como:

$$F\{f(t)\}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2i\omega t} dt, \quad (2.2)$$

donde i es la unidad imaginaria y ω es la frecuencia angular. Se acostumbra denotar esta transformada como

$$F\{f(t)\}(\omega) = F(\omega). \quad (2.3)$$

2.1.3 Transformada de Fourier discreta

Sin embargo, las señales con las que trabajamos no son continuas, por lo que no es posible utilizar la transformada de Fourier que se vio anteriormente, afortunadamente existe la versión discreta de esta transformada.

La transformada de Fourier discreta (DFT, por sus siglas en inglés) calcula el espectro en N frecuencias igualmente espaciadas de una longitud de N secuencias invertidas. La DFT en el tiempo (y también la transformada continua) puede ser evaluada cuando tenemos una expresión analítica para la señal. También nos permite calcular el espectro de información discreta en el tiempo. Estando en tiempo discreto podemos calcular exactamente el espectro.

Por ejemplo, considerando la fórmula para la transformada discreta de Fourier, para cada frecuencia que elijamos, debemos multiplicar cada valor de la señal por un número complejo y sumar los resultados. Para una señal valorada real, cada multiplicación real-por-complejo requiere dos multiplicaciones reales, significa que tenemos $2N$ multiplicaciones por realizarse (donde N es el número de multiplicaciones real-por-complejo). Para sumar los resultados juntos, debemos mantener la parte real y la imaginaria separadas.

Cabe mencionar que la duración de la señal debe ser finita para calcular el espectro de la señal. Es imposible guardar una señal infinita, así que asumimos que la señal se extiende sobre $[0, N - 1]$; por ejemplo, sumando N números requiere $N - 1$ sumas. Constantemente, cada frecuencia requiere $2N + 2(N - 1) = 4N - 2$ pasos básicos a realizar. Como tenemos N frecuencias, el número total de operaciones es $N(4N - 2)$.

La transformada discreta de Fourier se define entonces como

$$F(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f(t) e^{-2\pi i \omega t / N} \quad \forall \omega = 1, 2, 3, \dots, N - 1. \quad (2.4)$$

Para mayor detalle en análisis de Fourier discreto se recomienda consultar referencias como Bracewell (1986).

2.1.4 Espectro de potencia de una señal discreta.

La relación de Parseval establece que la energía total de una señal se puede determinar mediante el cálculo de la energía por unidad de tiempo ($|x(t)|^2$) e integrando sobre todo el tiempo, por lo que el espectro de densidad de potencia para una señal discreta estará dado por,

$$\sum_a^b |F(\omega)|^2, \quad (2.5)$$

donde $F(\omega)$ es una transformada de Fourier de $f(t)$ que es nuestra señal registrada.

El espectro de densidad de potencia (PSD por sus siglas en ingles) está dado por

$$PSD(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{|F(\omega)|^2}{T} \right), \quad (2.6)$$

donde $F(\omega)$ es el espectro de Fourier y T es el periodo. Es decir, se tiene la transformada de Fourier de la función de autocorrelación de la señal. Otra razón para usar la PSD es que ésta, a través del teorema de Parseval, nos permite calcular directamente la amplitud cuadrática media en el dominio del tiempo para cualquier ancho de banda, lo cual en nuestro tema es equivalente a obtener una medida cuantitativa del nivel del ruido en un ancho de banda determinado.

Las curvas de Peterson (1993) están dadas en amplitud en decibeles contra periodos o frecuencias, por lo que tendremos que calcular la amplitud de nuestro PSD. Denotaremos a la raíz cuadrada de la amplitud cuadrática media calculada en un ancho de banda entre las frecuencias ω_1 y ω_2 , como $A(\omega_1, \omega_2)$ y es determinada como

$$A(\omega_1, \omega_2) = \sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} PSD(\omega) d\omega}. \quad (2.7)$$

Peterson (1993) mostró que la amplitud del ruido sísmico registrado en un sensor de banda ancha y el ruido de periodo largo se comportan bajo una distribución de probabilidad Gaussiana y existe un 95% de probabilidad de que los picos instantáneos de amplitud en el dominio del tiempo de una señal aleatoria con una función de probabilidad Gaussiana esté en el rango de $1.25 * A(\omega_1, \omega_2)$; es decir,

$$|A| = 1.25 * A(\omega_1, \omega_2). \quad (2.8)$$

Hay que tener en cuenta que A puede estar en unidades de desplazamiento, velocidad o aceleración, dependiendo del tipo de corrección instrumental realizado a la señal. Debido a que los valores de A dependen del ancho de banda en el que se calcula el espectro, los cálculos se deben realizar en sub-bandas de ancho relativo constante; si la frecuencia máxima es el doble que la frecuencia mínima, se dice que el incremento de la frecuencia es en octavos y el valor de A que se obtiene en estos tipos de sub-bandas se asocia a la media geométrica dada por

$$f = (f_{\text{mín}} * f_{\text{máx}})^{\frac{1}{2}}. \quad (2.9)$$

Actualmente el ruido sísmico se da principalmente en decibeles de aceleración con respecto a 1 m/s^2 ; es decir,

$$PSD[dB] = 10 \log \left(\frac{Ac^2}{Hz} \right) - 10 \log \left[\frac{\left(\frac{m}{s^2} \right)^2}{Hz} \right], \quad (2.10)$$

donde Ac es la aceleración de la señal.

2.2 Decibeles

Un tipo conveniente de escala logarítmica es la dada por decibeles o escala dB. Ésta es una escala de proporción que relaciona el nivel medido de amplitud a un nivel de referencia. Los decibeles son útiles en la medición de vibraciones.

El concepto del decibel fue introducido por los laboratorios Bell Telephone antes de 1930. Se usó por primera vez, para medir la pérdida de fuerza relativa y la proporción señal/ruido en líneas telefónicas. Rápidamente se adoptó como una medida del nivel de presión acústica del sonido.

Se define el decibel (dB) por la expresión siguiente:

$$L_{dB} = 20 \log_{10} \frac{L_1}{L_{ref}}, \quad (2.11)$$

donde L_{dB} es el nivel de la señal en dB; L_1 , el nivel de vibración (para señales sísmicas, éste puede referirse al nivel de aceleración, velocidad, o desplazamiento); L_{ref} , el nivel de referencia equivalente a 0 dB .

2.3 Ondas superficiales

El ruido sísmico de fondo a analizar está compuesto principalmente por ondas superficiales tipo Rayleigh. Por lo tanto, en esta sección se mencionará un poco de la teoría básica sobre ondas superficiales.

La teoría de la elasticidad dice que existen dos posibles tipos de ondas elásticas que viajan a través de un medio elástico homogéneo, y que son conocidas como ondas de cuerpo, las cuales pueden ser compresivas P o de cizalla S , la cual tiene dos grados de libertad frecuentemente conocidos como SV para la componente vertical y SH para la componente horizontal (Figura 2.1) (Stein y Wysession, 2003). Además, las ondas que viajan a través de un medio elástico y que se propagan a lo largo de la superficie, generan otras cuya amplitud es grande sólo en las proximidades de la superficie libre y que son llamadas ondas superficiales Rayleigh y Love. Una de las diferencias con las ondas de cuerpo es el rango de decaimiento, por eso las ondas superficiales después de un terremoto pueden seguir dando la vuelta al globo.

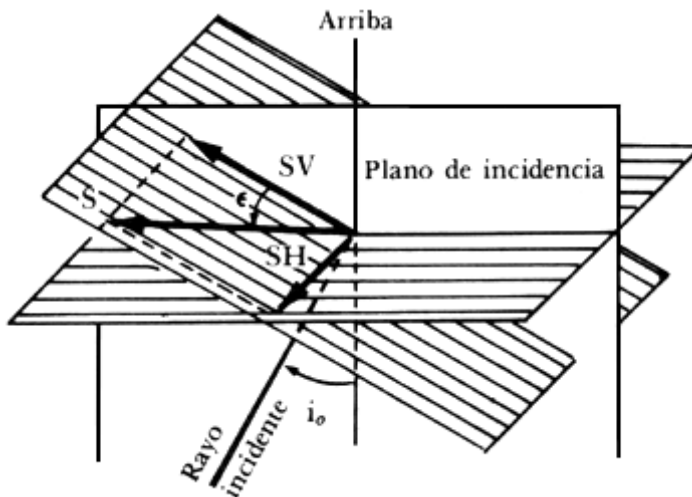


Figura 2.1: Componente vertical y horizontal de la onda de cuerpo S (Tomada de Udías, 1971).

Las ondas superficiales son ondas que durante su propagación viajan por la superficie del medio y cuyo desplazamiento disminuye al aumentar la profundidad (Figura 2.2) y el desplazamiento de estas ondas no tiene componente transversal.

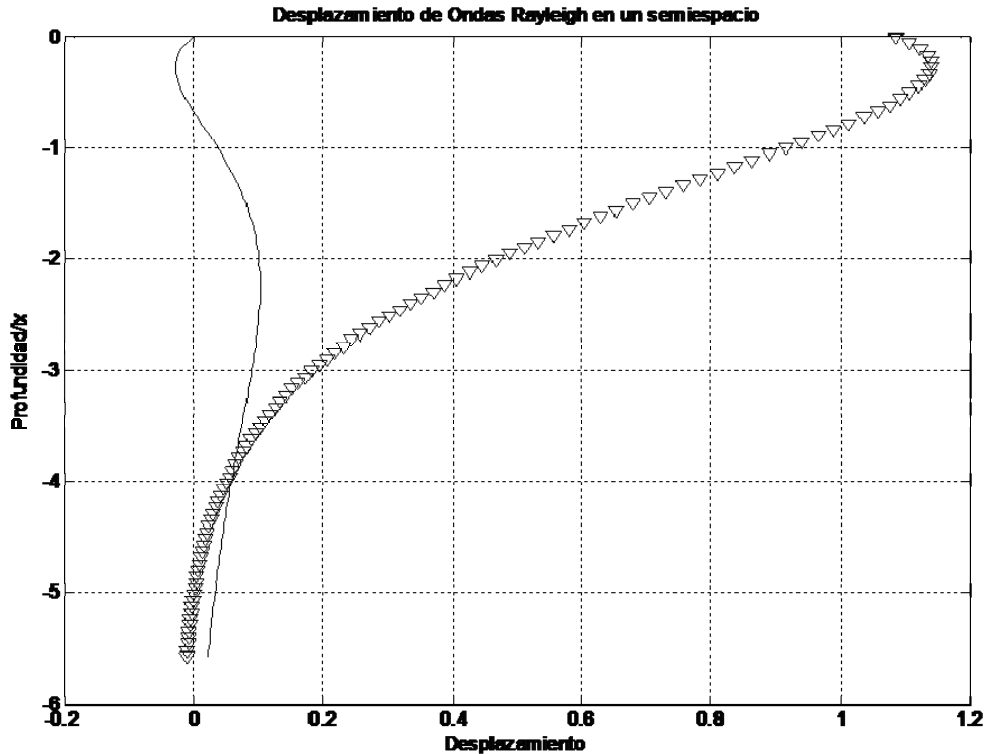


Figura 2.2: Variación con respecto a la profundidad de las componentes horizontal (línea continua) y vertical (triángulos) de una onda Rayleigh en un semiespacio compuesto por un sólido poissoniano.

Las *Ondas Rayleigh* se deben a la interacción entre las ondas *P* y las *SV*, y el movimiento de cada partícula de la superficie del terreno, al paso de la onda, se da en forma de elipse retrógrada (Figura 2.3).

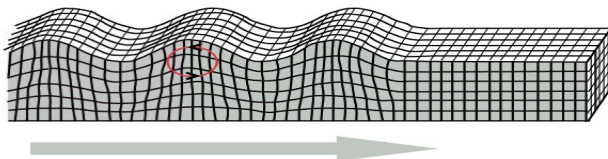


Figura 2.3: Descripción del movimiento de una onda superficial tipo *Rayleigh* (Tomada de Stein y Wysession, 2003).

Las *Ondas Love* (Figura 2.4) se deben a interferencia constructiva de ondas *SH*, por lo que no pueden existir en un semiespacio, sino que requieren al menos una capa sobre un semiespacio, donde pueda quedar atrapada parte de la energía sísmica.

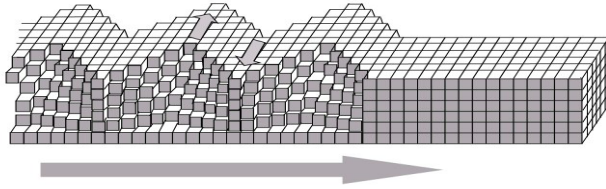


Figura 2.4: Descripción del movimiento de una onda superficial tipo Love (Tomada de Stein y Wysession, 2003).

2.3.1 Velocidad de Fase y Grupo.

Si tomamos una fase en particular de la una onda sinusoidal (por ejemplo un máximo), ésta parecerá estar viajando a una velocidad conocida como velocidad de fase. El movimiento de un grupo de ondas puede considerarse como un tren de onda sinusoidal con frecuencia central y número de onda, mientras que la envolvente varía lentamente en el espacio y en el tiempo. La velocidad de la envolvente se denomina velocidad de grupo. La variación periódica de la envolvente en el espacio forma numerosos paquetes de ondas. La velocidad de grupo se corresponde con la velocidad de estos paquetes.

Para la Figura 2.5 se utilizaron dos ondas sinusoidales con diferentes frecuencias y números de ondas; sin embargo, al sumarse nos dan una onda en función del tiempo. Se distinguen dos tipos de velocidades, la velocidad de un pulso bien identificado que nos da la velocidad de fase, mientras que la velocidad de un nodo nos da la velocidad de grupo (Stein y Wysession, 2003).

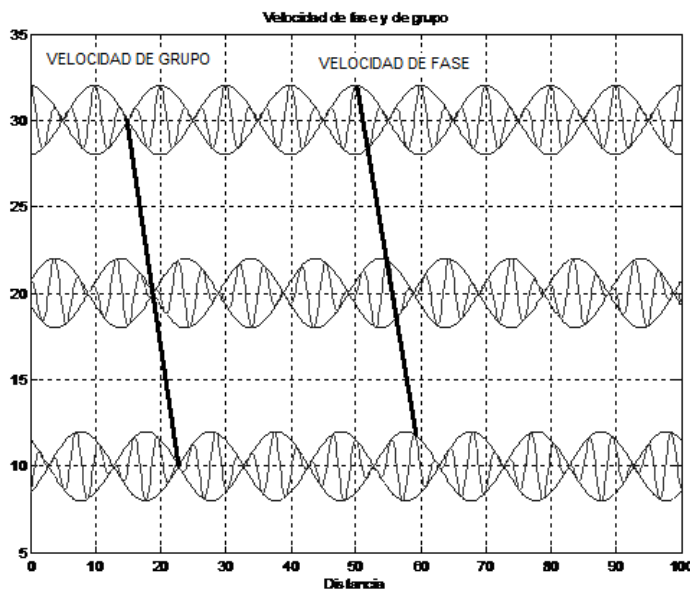


Figura 2.5: Velocidad de fase y de grupo, como se puede observar, la velocidad de grupo está dada por la onda 'envolvente' (izquierda) y la velocidad de fase por la onda 'transportadora' (derecha).

2.3.2 Dispersión

La dispersión se puede definir como una dependencia de la frecuencia a partir de la propagación horizontal de la velocidad.

Generalmente en un medio elástico, la rigidez aumenta con la profundidad con lo que aumenta la velocidad de la onda y podemos con esto decir que la velocidad de fase aumenta. Se sabe que cuando aumenta la velocidad de fase, también aumenta la longitud de onda, y que ésta tiene una relación con la frecuencia, dada por

$$c = f * \lambda, \quad (2.12)$$

donde c es la velocidad de fase, f es la frecuencia y λ es la longitud de onda. Con esto podemos observar que a medida que la velocidad de fase aumenta, la frecuencia disminuye; a esto se le llama *dispersión* (Flores, 2004).

Las ondas superficiales se propagan en un semiespacio y en una capa, cuando la velocidad de propagación no es constante, sino que es una función de la frecuencia, las ondas Love serán dispersivas al variar la velocidad aparente a lo largo de la superficie en función de la frecuencia.

Para el estudio de la dispersión se usa una representación de curvas de la velocidad de propagación en función del periodo o de la frecuencia, a dichas curvas se les conoce como *curvas de dispersión* (Figura 2.6).

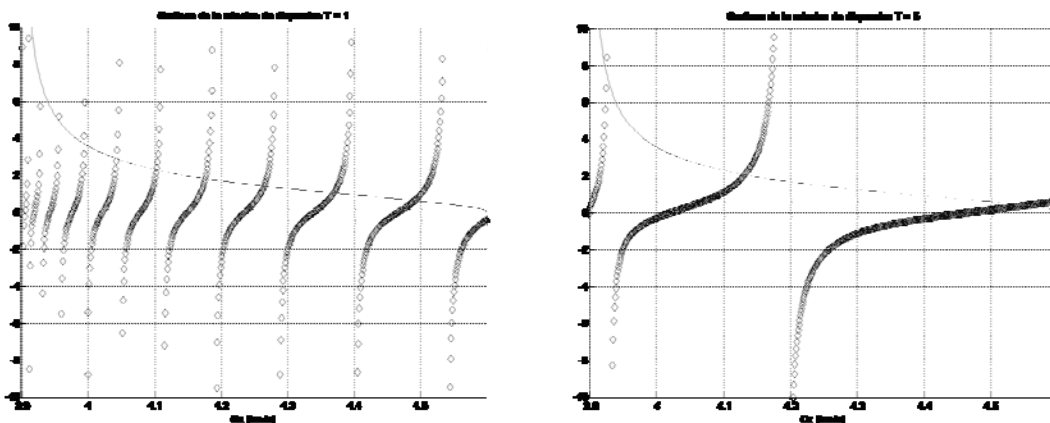


Figura 2.6: Relación de dispersión de las ondas Love en un semiespacio para $T = 1$ (izquierda) y $T = 5$ (derecha). A la primera intersección entre las curvas se le conoce como modo fundamental, las demás intersecciones son conocidas como modos o sobretonos (Stein y Wysession, 2003).

2.4 *Resonancia*

La resonancia es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo periodo de vibración coincide con el periodo de vibración característico o frecuencia natural de dicho cuerpo.

Una frecuencia natural es una frecuencia a la que una estructura vibrará si se aplica un impulso a ésta. Una estructura típica tendrá muchas frecuencias naturales. Cuando ocurre la resonancia, los niveles de vibración que resultan pueden ser muy altos. En estas circunstancias la estructura vibra, aumentando de forma progresiva la amplitud del movimiento tras cada una de las actuaciones sucesivas de la fuerza. Este efecto puede ser destructivo en algunos materiales rígidos.

Una vez revisada las bases teóricas necesarias, en el siguiente capítulo aplicaremos estos conocimientos para definir el ruido sísmico de fondo.

CAPÍTULO 3. Curvas de ruido sísmico.

Después de haber repasado los conceptos matemáticos y sismológicos básicos para el estudio de las curvas de ruido, en este capítulo nos damos a la tarea de describir el concepto de ruido y cómo se obtienen las curvas de ruido de estaciones sismológicas.

3.1 *Ruido vs Señal*

Una señal es una función definida con respecto a una variable independiente. Regularmente, esta variable es el tiempo. En sismología se conoce a la señal como un conjunto de ondas propagadas a lo largo de un medio, registradas por un dispositivo receptor (sismógrafo). Además transporta información de interés particular, como puede ser la dirección y la distancia a la que se encuentra la fuente.

El proceso de transmisión de señales siempre tiene involucradas perturbaciones e interferencias no deseadas, que son producidas por señales ajenas a las mismas. Estas señales ajenas son las que ocasionan el ruido en el sistema, dado que éstas generalmente no son deseadas porque producen una distorsión en la recepción de la señal sísmica original. Las señales que producen ruido en estos sistemas son de origen aleatorio (señal estocástica).

El ruido natural de fondo está formado por aquellas vibraciones percibidas por el sensor que tienen como origen cualquier fuente diferente a los sismos. Generalmente la gran mayoría de estas vibraciones son generadas por fenómenos meteorológicos. En el presente trabajo se logró identificar y caracterizar dentro de las curvas de ruido sísmico diferentes tipos vibraciones de fuentes naturales.

3.2 *Historia de las curvas de ruido sísmico*

Como se menciona en el Capítulo 1, los microsismos fueron estudiados por primera vez por Timoteo Bertelli (Moreno y Alfaro, 2000), quien encontró que las variaciones en las oscilaciones coincidían con telesismos y variaciones de la presión atmosférica, aunque también atribuyó algunas de ellas a la acción del viento o a las mareas; además notó una ligera diferencia entre las intensidades de

estas variaciones, las cuales aumentaban durante el invierno y disminuían durante el verano.

A partir de mediados del siglo XX, con el mejoramiento de la sensibilidad de los instrumentos de medición sísmica, el estudio de los microsismos tomó una gran importancia. Surgieron dos teorías sobre el origen de los microsismos que tomaron gran fuerza.

La primera de las teorías, de los estudios de Bertelli, aseguraba que la fuente de estos microsismos estaba dada por los cambios en las presiones atmosféricas. Son varios los investigadores que apoyaron esta teoría (p.e., Klotz et al., 1908; Whipple y Lee, 1935), aunque también concluyeron que no era posible determinar el mecanismo por el que estos cambios en la presión producen las variaciones (Whipple y Lee, 1935).

La otra teoría proponía que la fuente de los microsismos era el rompimiento de las olas a lo largo de las costas y que era probable que algún estrato entrara en resonancia por la transmisión de energía de las olas del mar (Zanon, 1938).

Con el paso del tiempo se logró demostrar que las ondas de los microsismos no son ondas estacionarias y que es posible determinar la dirección de la fuente del ruido cuando ésta se encuentra lo suficientemente cercana a las estaciones (Ramírez, 1939).

Generalmente las depresiones barométricas relacionadas con la fuente de microsismos se encuentran sobre los océanos. Tomando en cuenta que las bajas presiones originan tormentas y mal tiempo en general, la conclusión fue que la fuente de los microsismos es la conjunción de fenómenos naturales tales como tormentas, cambios en la presión, el oleaje en el mar, etc. (Whipple y Lee, 1935).

Las curvas de ruido precursoras a las actuales fueron obtenidas por Brune y Oliver (1959) mediante el estudio de las diferencias entre las amplitudes de los registros obtenidos en un periodo aproximado de un año en las estaciones sísmicas de los Observatorios de Investigación Sísmica (SRO, *Seismic Research Observatories*), las cuales trabajaban a 20 muestras por segundo (mps) en sus tres componentes y se encontraban dentro de pozos de aproximadamente 100 m de profundidad, con lo que los efectos de viento en la superficie no afectaban significativamente.

Actualmente, la base para la evaluación de las curvas de ruido en una estación sísmica son los resultados obtenidos por Peterson (1993), él obtuvo las curvas de densidad de potencia de aceleración para 75 estaciones digitales distribuidas por

todo el mundo, parte de la Red Sismográfica Global (GSN, *Global Seismographic Network*), que toman registros con frecuencias de 20, 40, 80 y 100 mps. En los estudios realizados por Peterson (1993) se proponen dos nuevos modelos para las curvas de ruido, una curva de ruido bajo y una de ruido alto (Figura 3.1). Para realizar estas gráficas no fue necesario buscar sitios tranquilos o sin ruido sísmico de fondo, sino que a partir de las estaciones con las que se contaba se identificó el nivel de ruido sísmico más alto y el más bajo.

El ruido sísmico de fondo durante los intervalos de quietud que aparecía en muchas de las estaciones y que estaba fuera de los periodos comprendidos por la banda microsísmica principal (1 – 20 s) fueron marcados y examinados minuciosamente. La importancia de esta colección de datos es la de poder descartar los efectos de los eventos sísmicos y de algunos fenómenos atmosféricos, además de contar con intervalos de tiempo consistentes en los datos para el procesamiento final.

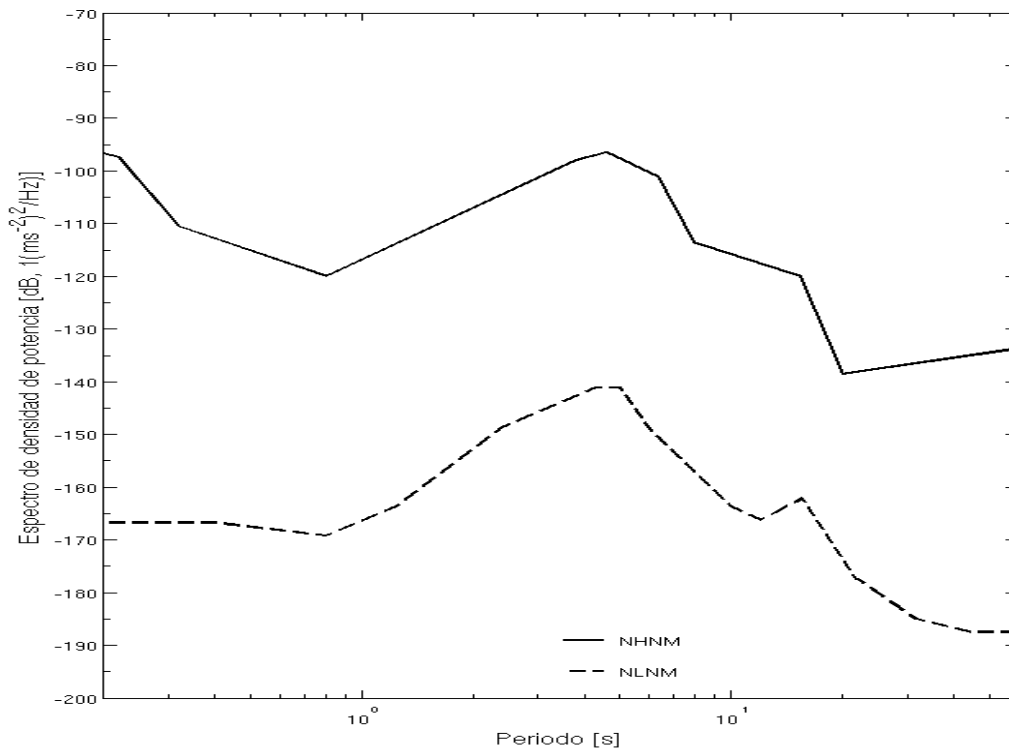


Figura 3.1: Modelos de ruido sísmico obtenidos por Peterson (1993). NHHM= modelo nuevo de ruido alto (*New High Noise Model*); NLNM = modelo nuevo de ruido bajo (*New Low Noise Model*).

Gracias a estudios como éstos, sabemos que el ruido sísmico de fondo está presente en todos los registros sísmicos y que afecta o enmascara las señales

sísmicas. Con el objetivo de minimizar estos efectos, se ha tratado de correlacionar las diferentes bandas de frecuencias con fuentes de ruido sísmico, de esta manera se sabe qué frecuencias no deseadas están afectando a nuestra señal de interés, pudiendo de esta manera desarrollar filtros para eliminar el efecto de la fuente de ruido sísmico. Estudios similares fueron realizados por Macnamara (2004), encontrando diferencias entre las amplitudes en ciertas bandas de frecuencias con respecto a cambios estacionales, diurnos y también en función de la geografía del lugar.

Macnamara (2004) encontró que existen variaciones considerables en el ruido sísmico durante el transcurso del día y entre las estaciones de año; logró crear un mapa de ruido sísmico con su red de trabajo, además de que obtuvo los espectros de densidad de potencia (PSD) para sismos regionales, telesismos, cuando las masas del sensor se están calibrando, cuando las masas se están centrando y cuando existe un hueco (*gap*) en los registros.

Los estudios de Peterson (1993) y Macnamara (2004) fueron las principales guías en el estudio del ruido sísmico de fondo del proyecto MASE.

3.3 Obtención de las curvas de ruido

Para obtener la curva de ruido sísmico de un sitio en particular se necesita registrar ruido sísmico de fondo por un tiempo, el cual está determinado por el rango de periodos en el que estemos interesados analizar (mientras más tiempo de registro se tenga los periodos que pueden ser analizados serán mayores). El primer paso en el tratamiento de los datos a trabajar, es la eliminación de la línea base y de la tendencia para proseguir con la corrección por instrumento. Si el objetivo de las curvas de ruido sísmico de fondo es la de caracterizar las fuentes del ruido es necesario que las muestra de registros a analizar sean tomadas de intervalos de tiempo en donde la fuente esté más y menos activa (por ejemplo escoger registros en el día y en la noche para ver variaciones diurnas o efectos de ruido cultural). También es importante que durante los intervalos de tiempo de los registros que se utilizaran para generar las curvas de ruido no se tengan sismos, ya que dependiendo del tipo de evento sísmico podría ocasionar que nuestras amplitudes en determinados periodos del ruido a analizar se incrementaran. El siguiente paso será el de tomar ventanas de tiempo corto (determinado por el periodo más largo que queramos analizar) para hacer un promediado y obtener los PSD.

En el caso de este trabajo se utiliza un día de registro de cada mes del año durante el periodo en que las estaciones del proyecto MASE estuvieron en operación (2.5 años). Se continua con la corrección por instrumento (ver Apéndice 3), para ello se utilizó la hoja de calibración del sensor CMG-3T para conocer en qué intervalos de frecuencia el sensor tiene una respuesta plana. Después se escogieron dos horas de registro, una en el día y otra en la noche, seleccionando horas en las que no se observaran eventos sísmicos locales, regionales o telesísmicos, para de esta manera obtener exclusivamente los registros de las vibraciones naturales de fondo. Entonces, cada hora fue dividida en ventanas de 60 s, utilizando una ventana coseno al 5%. Hecho esto se obtuvieron los PSD de los intervalos de tiempo seleccionados, realizando los cálculos con ayuda de un

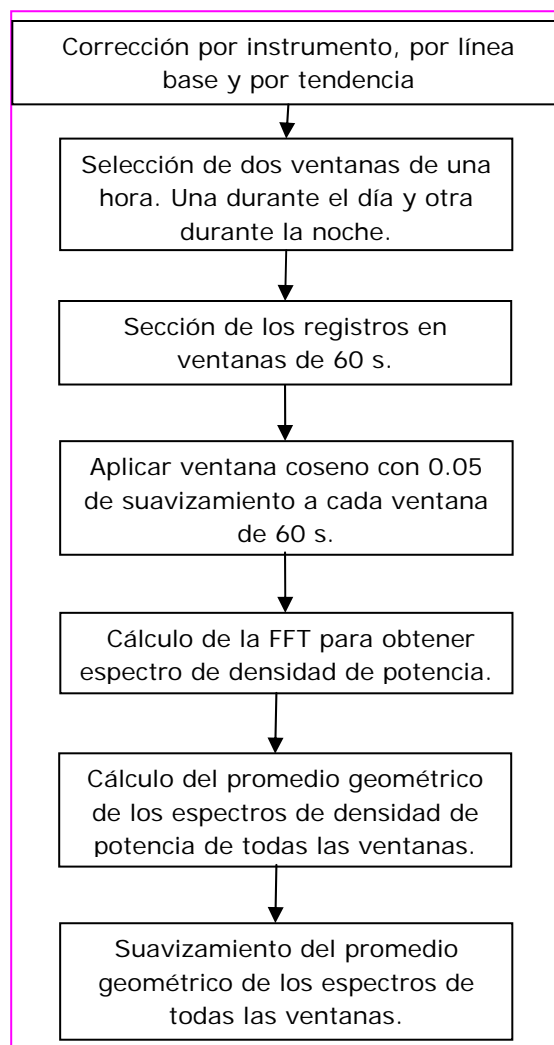


Figura 3.3: Diagrama de flujo para el cálculo de curvas de ruido sísmico. Modificada de Solano Hernández (2006)

programa de cómputo en MATLAB, inicialmente elaborado por Solano Hernández (2006) y modificado para esta tesis. La Figura 3.2 muestra el diagrama de flujo del procesamiento.

3.4 Interpretación de las curvas de ruido

Los sismogramas de una estación de banda ancha siempre contienen ruido. Como se explicó anteriormente, las curvas de ruido sísmico son los espectros de densidad de potencia de una señal sísmica registrada durante un intervalo de tiempo, expresada en decibeles sobre frecuencia o periodo.

Las curvas de ruido representan la amplitud en decibeles de la señal en función del periodo. El rango del periodo comprendido en este trabajo va de 0.1 hasta 60 s, en el cual se pueden identificar diversas fuentes (Fig. 3.3).

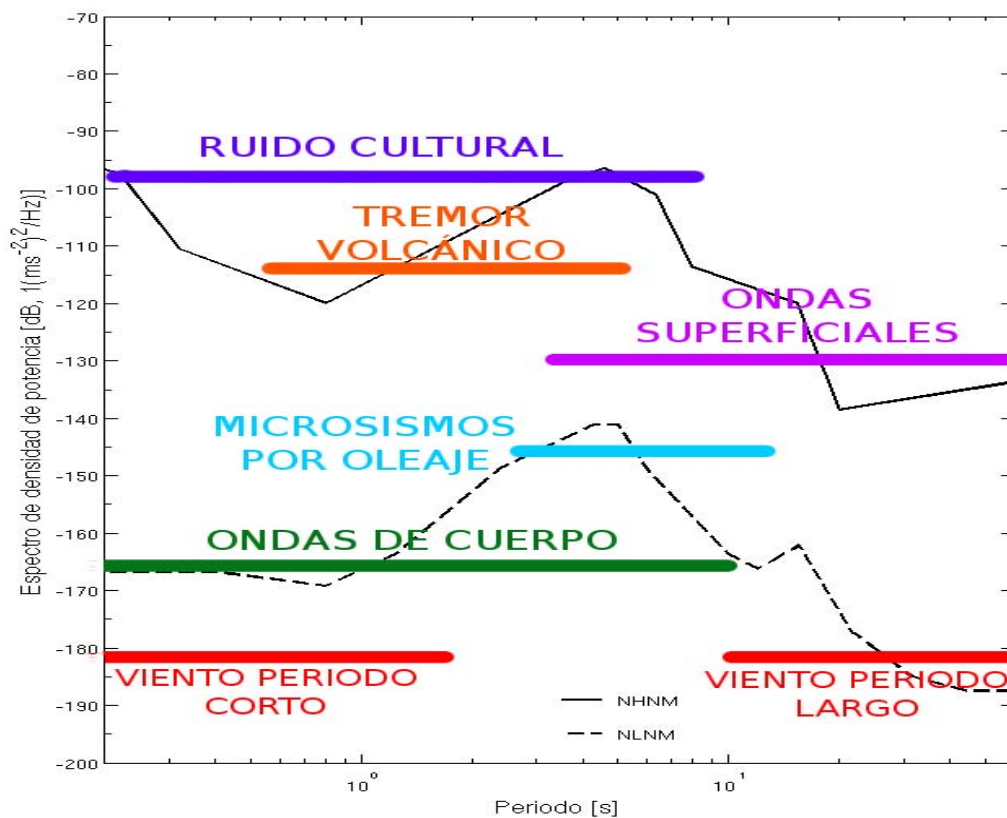


Figura 3.3: Ancho de banda de las ondas sísmicas.

3.4 Variaciones y fuentes del ruido sísmico.

Como se mencionó antes, se considera ruido a todas aquellas señales que producen una distorsión en la recepción de la señal sísmica original. Estas señales son aleatorias y tienen fuentes diferentes. A continuación se tratarán de explicar algunas de las fuentes más comunes e importantes y cómo es que afectan a nuestra señal original.

3.4.1 Ruido Meteorológico.

Entenderemos por ruido meteorológico a aquellas vibraciones ambientales generadas por fenómenos climatológicos. Las ondas dominantes en cualquiera de los instrumentos provienen de las vibraciones ambientales de la Tierra, por ejemplo los objetos se mueven respondiendo a la acción del viento y este movimiento cuando está acoplado a la tierra puede ser fuente importante del ruido sísmico. El ruido causado por eventos meteorológicos puede sufrir de variaciones en lapsos cortos de tiempo dando paso a variaciones diurnas dentro de los registros, pero de igual manera, los eventos meteorológicos están estrechamente relacionados con la época o estación del año en la que nos encontremos, por lo que también encontraremos variaciones estacionales al comparar las curvas de ruido sísmico. Como fuentes adicionales en este tipo de ruido pueden incluirse los cambios en la presión atmosférica, las corrientes de agua, olas, etc.

El más notorio de este tipo de ruido es el generado por el oleaje marino, el cual se ha observado en estudios previos de ruido sísmico en todo el mundo. Las olas disipan su energía de varias maneras. Una parte puede convertirse en una corriente superficial, un desplazamiento en masa de un gran volumen de agua hasta una profundidad considerable. Otra parte se disipa por fricción con el aire, en una inversión de los fenómenos que puso en marcha las olas. Parte de la energía puede disiparse si una velocidad excesiva del viento provoca la ruptura de las crestas. Por último, la energía termina por disiparse por interacción con la corteza sólida, cuando el fondo es poco profundo o cuando finalmente las olas se estrellan con la costa ejerciendo una gran fuerza sobre esta, como un ejemplo una ola de 6 m de altura se estrella contra la costa con una fuerza de más de 25 toneladas por metro cuadrado aprox.

Existen dos tipos de olas (Cifuentes Lemus et al., 1997):

- **Olas libres:** Se representan en toda la superficie del mar y se deben a las variaciones del nivel del mar. En ellas el agua no avanza, sólo describe un

giro al subir y bajar casi en el mismo sitio en el cual se originó el ascenso de la ola, este tipo de olas no presenta periodicidad por lo que no es posible identificarlas dentro de las curvas de ruido.

- **Olas forzadas:** Se producen por el viento y en ocasiones pueden ser altas como consecuencia de los huracanes y se observan como un “pico” de aproximadamente 7 s de periodo en promedio dentro de las curvas de ruido.

3.4.2 Ruido cultural

El ruido cultural está compuesto por aquellas vibraciones percibidas por el sensor y que tienen como fuentes todas las actividades relacionadas con la actividad humana, principalmente por la maquinaria que éste utiliza. El ruido cultural se propaga como ondas superficiales de alta frecuencia, las cuales se atenúan bastante en pocos kilómetros de distancia, por lo que se puede obtener una notable reducción en este tipo de ruido colocando el sensor en pozos, cavidades profundas o túneles. Además, el ruido cultural por deberse a la actividad humana, presenta una enorme variación diurna y algunas frecuencias características que dependen de la fuente del ruido. Generalmente este tipo de ruido tiene periodos de 1-10 Hz ó 1-0.01 s.

3.4.3 Ruido inherente del sensor

- **Ruido electrónico.**

Por ruido eléctrico entenderemos cualquier cambio en aleatorio de una magnitud eléctrica (sea corriente, tensión, etc.) que tienda a enmascara la señal de interés para nosotros.

La presencia de ruido en un sistema eléctrico es inevitable y puede provocar falsas respuestas en él.

- **Corrientes de convección** dentro del sensor debido a la disipación de calor.
- **Relajación** de la tensión en los resortes y metal del equipo.

- **Dilatación y contracción** del equipo debido al calor.

Los cambios de temperatura, expansión y contracción del concreto donde se encuentra el instrumento pueden también ser causantes de ruido de período largo

En el Capítulo 4 se presentará el proyecto MASE, la instalación de sus estaciones sismológicas y sus niveles de ruido encontrados, así como algunos ejemplos de caracterización de las curvas de ruido.

CAPÍTULO 4. Ruido en las estaciones sismológicas de MASE.

4.1 Proyecto MASE

MASE (*Meso-American Subduction Experiment*) es un proyecto de colaboración entre el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Tecnológico de California (Caltech) y la Universidad de California en los Ángeles (UCLA), el cual, como se mencionó anteriormente, tiene como objetivo principal crear un modelo dinámico de la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana. Para este fin se instalaron 100 estaciones de banda ancha a lo largo de una línea que va desde Acapulco, Gro., hasta Tempoal, Ver., siendo el Distrito Federal el punto medio de esta línea (Figura 4.1).



Figura 4.1: Distribución de las estaciones del proyecto MASE (puntos rojos).

Los criterios usados en la selección de los sitios incluyeron la calidad del suelo en el sitio (niveles de ruido y efecto de sitio esperados), su localización con respecto a la línea MASE, la seguridad del equipo, el acceso a la estación y la línea de la vista para el 50% de ellas, ya que transmitieron datos en tiempo real; sin embargo,

se dio una prioridad más alta a su ubicación con respecto a la línea y la seguridad del equipo, y debido a esto último, la mayoría de las estaciones se encontraban dentro de escuelas o instituciones públicas o en su defecto en terrenos privados (Apéndice 1). Para el resguardo de los equipos durante el periodo de registro se construyeron instalaciones temporales a la largo de toda la línea MASE, cada una de ellas contaba con 5 km aproximadamente de separación con respecto a las estaciones aledañas. Estas instalaciones consistían de un recipiente de 1 m³ aproximadamente, de tabique rojo recocido en los muros y una losa de 7 cm de espesor de concreto armado para mantenerlo aislado de los cambios de temperatura; además, contaban con un pilar de concreto de 30 cm de diámetro y 30 cm de altura, anclado al suelo mediante un armado de concreto de 20 cm de diámetro con solo dos varillas de 3/8" a 80 cm de profundidad (Figura 4.2). Se trató de utilizar la menor cantidad de acero posible para evitar el ruido en bajas frecuencias introducido por la dilatación de los metales (varillas) que reforzaron el pilar de concreto sobre el que descansó un sensor de banda ancha Guralp CMG-3T.

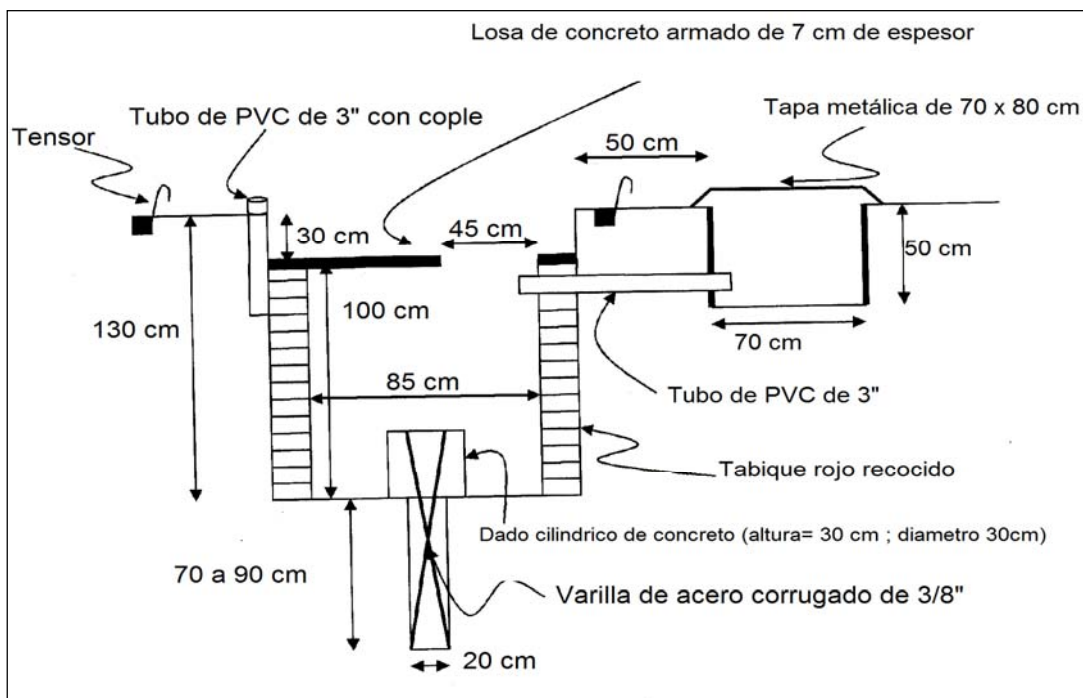


Figura 4.2: Base de resguardo temporal para equipo sísmico.

Para el depósito del digitalizador se construyeron recipientes de concreto de 70x80 cm² con tapa metálica, dentro del cual se colocaron el digitalizador (Reftek 130), la caja de control del sensor, el controlador de carga y la batería, de tal manera que lo único que quedaba en superficie fue el poste que sostenía al panel

solar, enterrado 50 cm para evitar movimientos considerables como producto del viento (Figura 4.2).

Además de todas las medidas que se tomaron para evitar cambios de temperatura en las bases de resguardo, se trató de aislar al sensor al momento de su instalación cubriéndolo con un recipiente de PVC forrado con poliburbuja. Además, las tapas del depósito del sensor eran de poliestireno, y se sellaron todos los conductos que conectaban a este depósito con el del digitalizador con espuma de poliuretano (Figura 4.3).



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)

Figura 4.3: (A) Bases de resguardo para el sensor y digitalizador. (B) Sensor CMG-3T sobre pilar de concreto ubicado dentro de la base de resguardo. (C) Tubo de PVC recubierto con poliburbuja para aislar al sensor. (D) Tapa de poliestireno (unicel) para aislar la entrada del depósito. (E) Vista final de una estación instalada y claro ejemplo de una estación el suelo blando.

4.2 Niveles de ruido.

Como se mencionó en el Capítulo 3, para generar las curvas de ruido en este trabajo se tomó un día de cada mes, generalmente se tomó el día 15 de cada mes, a excepción de algunos meses del año 2005 que se escogieron diferente por haber ocurrido algún evento meteorológico que resulto de utilidad para caracterizar algunas fuentes de ruido meteorológico. En la Figura 4.4 se muestra la disponibilidad de los datos de todas las estaciones de la línea MASE durante los 2 años y medio que duro el proyecto.

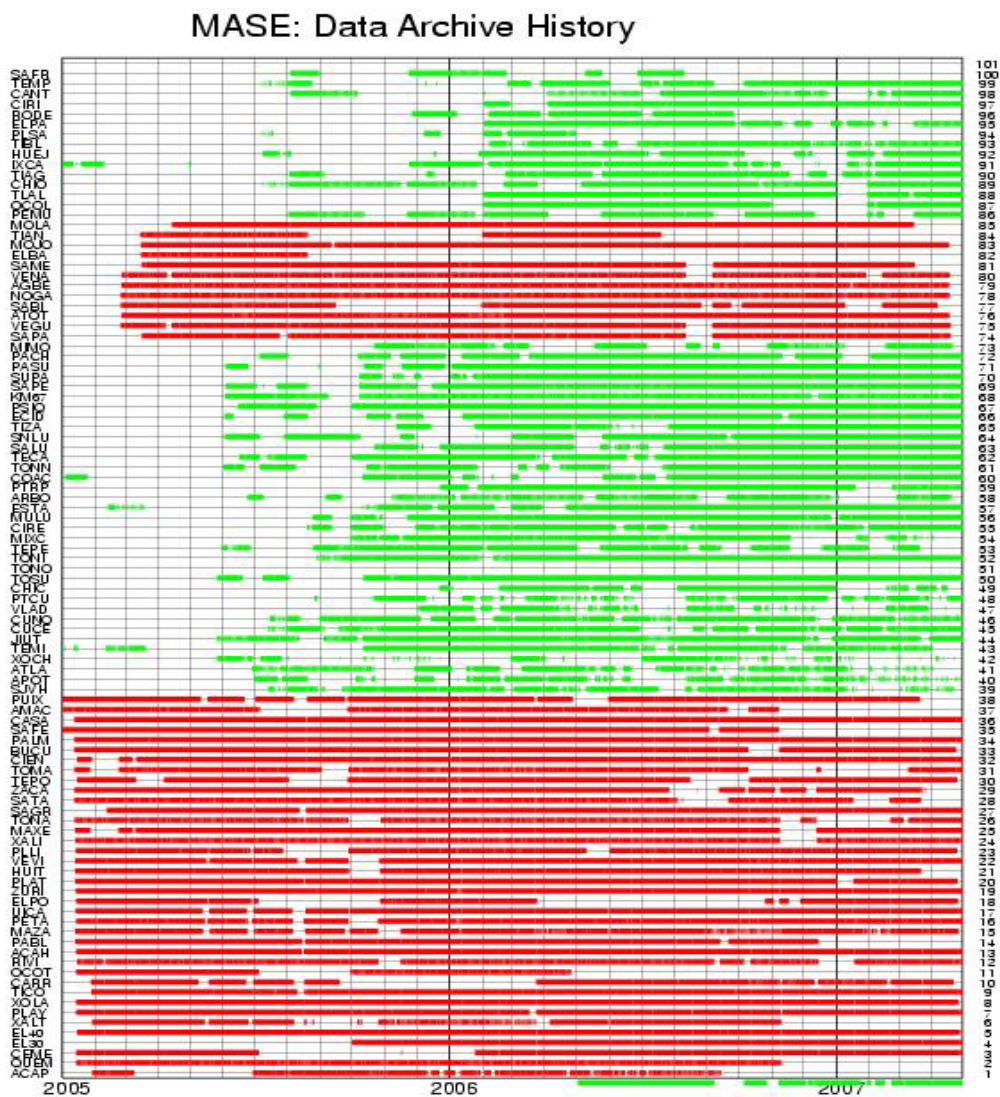


Figura 4.4: Disponibilidad de datos del proyecto MASE. En el eje de las abscisas se representa el tiempo que duro el experimento y en el eje de la ordenadas están las estaciones que componían la línea MASE ordenadas por latitud de Norte a Sur (de arriba hacia abajo). En rojo se denotan las estaciones pertenecientes a Caltech y en verde las estaciones de la UCLA. Los espacios en blanco representan los tiempos en los que la estación correspondiente no registro datos (Husker et al., 2008).

La Figura 4.5 muestra las curvas de ruido sísmico de todas las estaciones de la línea MASE del 15 de junio del 2006, a cada una de las curvas se le asignó un color dependiendo de la latitud a la que se encontraba instalada. Como se puede observar, la gran mayoría se encuentran dentro del rango estimado por Peterson (1993), exceptuando algunas cuantas que están por arriba de lo normal, especialmente en altas frecuencias, estas curvas coinciden, como lo hace evidente su color, con las estaciones instaladas en ciudades grandes, como lo son Chilpancingo, Cuernavaca y el Distrito Federal.

En la gráfica también se observan algunas curvas muy por debajo del promedio, las cuales corresponden a los sensores que se encontraban con las masas bloqueadas, esto puede deducirse al observar que son por lo menos 3 estaciones diferentes (diferente latitud) las que arrojan casi exactamente la misma curva, además de la forma de la curva, lo cual nos hace pensar que se trata únicamente del ruido electrónico del sensor el que se está registrando.

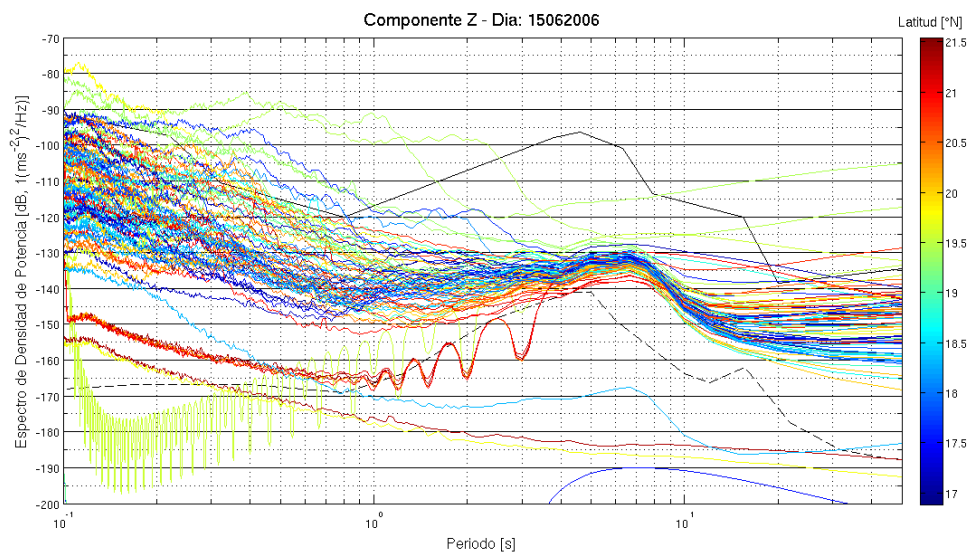


Figura 4.5: Niveles de ruido sísmico a lo largo de la línea MASE. Las líneas negras corresponden a las curvas de ruido de Peterson (1993). El color de las curvas de ruido corresponde a la latitud en la que se encuentra localizada la estación.

4.2.1. Observaciones de las variaciones y fuentes

Como se comentó en el Capítulo 3, las principales fuentes del ruido sísmico son dos, siendo el ruido cultural y el meteorológico los más relevantes para este trabajo.

Para poder llegar a determinar las fuentes del ruido que afectaban a cada una de las estaciones, se obtuvieron los gráficos por separado para cada una de ellas (Apéndice 1), identificando los “picos” o anomalías en la curva en periodos específicos; después, se utilizó como guía la Figura 3.2 junto con el conocimiento de las características de los sitios en donde se realizaron las instalaciones de los equipos para poder encontrar una posible fuente de ruido.

CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ACAP	Acapulco Gro.	16.884	-99.8494	156	Escuela	Alto en bajas frecuencias

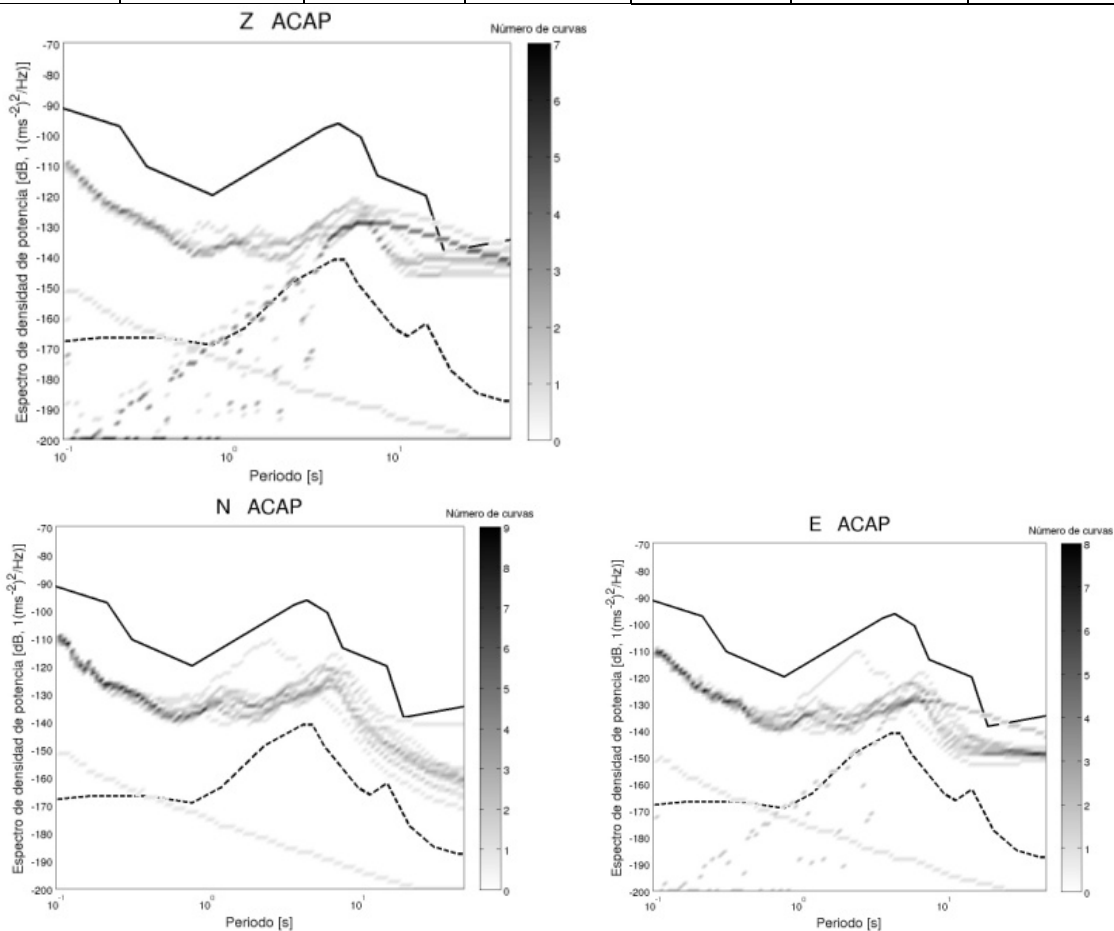


Figura 4.6: Gráficos de distribución de probabilidad de las curvas de densidad de potencia para la estación ACAP del experimento MASE. Las líneas negra continua y negra punteada representan las curvas NHNM y NLNM, respectivamente, de Peterson (1993). El eje de las abscisas representa el periodo en segundos y el de las ordenadas, la amplitud en decibeles.

Para ilustrar lo anterior, a continuación se mostraran una serie de curvas de ruido sísmico de diferentes estaciones de la línea MASE (Figuras 4.7 a 4.12). En cada

gráfica se muestran las curvas de seis días correspondientes a diferentes estaciones del año, en dos de ellos existió un fenómeno meteorológico de interés: los huracanes “Gert” y “Dora” que tocaron costas mexicanas llegando por el Océano Pacífico y el Atlántico, respectivamente.

La Figura 4.7 es un ejemplo claro de ruido cultural, la estación se encontraba instalada dentro de una escuela, además de estar cerca a la carretera Pachuca-Huejutla. Se puede observar claramente que la intensidad de la señal que está entre 0.1 y 0.4 s aumenta considerablemente. La gráfica está constituida por seis pares de curvas. El color de cada una de ellas corresponde con la fecha de la que se tomaron los datos las cuales se muestran en la parte derecha de la figura. Se puede notar que hay líneas punteadas y continuas, las líneas punteadas corresponden a las curvas de ruido que se calcularon con datos nocturnos, mientras que las líneas continuas corresponden al día. La parte enmarcada en rojo corresponde a periodos cortos que son los más afectados por el ruido generado por la actividad humana y por la acción del viento en estructuras pequeñas. Se observa claramente como el nivel de ruido en la noche es menor que el ruido registrado durante el día, esto claramente se debe a que la actividad humana es más intensa en el día con respecto a la noche.

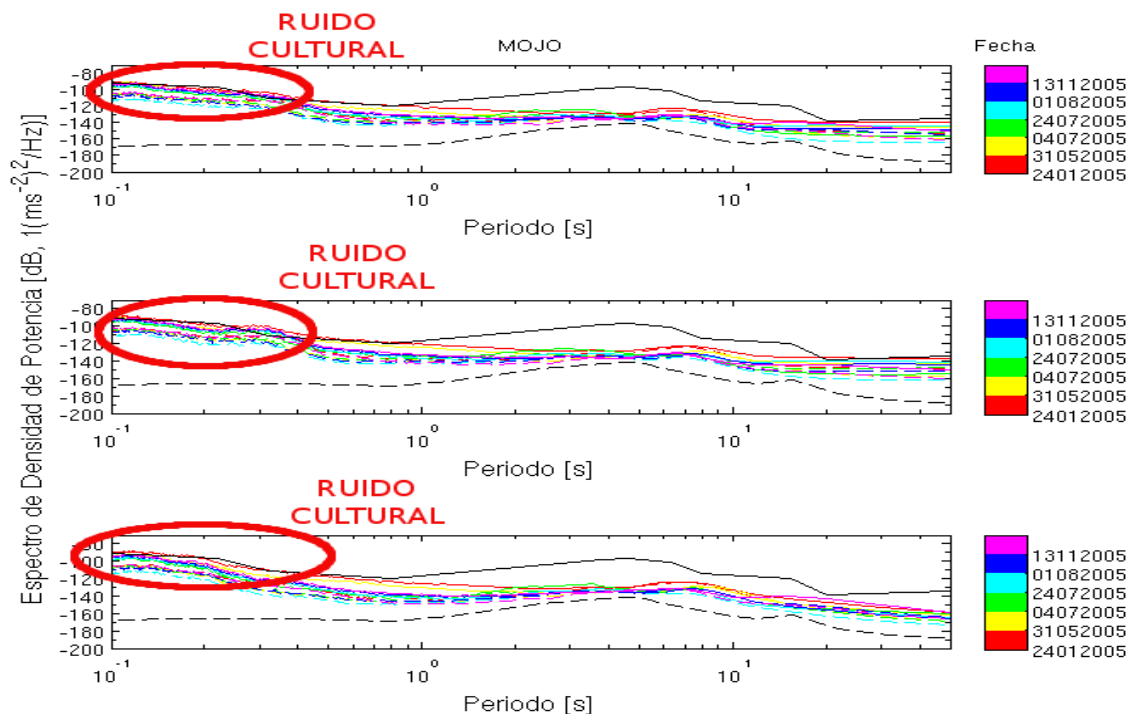


Figura 4.7: Curvas de ruido de la estación MOJO (La Mojonera, Hidalgo.). A la derecha se muestra el código de colores utilizados para cada uno de los seis días de registro. Las líneas continuas representan el día y las punteadas la noche. La gráfica de la parte superior corresponde a la componente vertical z, la gráfica de en medio a la componente horizontal N-S y la grafica inferior a la componente horizontal E-W.

En cuanto al ruido ocasionado por procesos hidro-meteorológicos, también existen ejemplos muy claros, el primero y más evidente de ellos es el provocado por el oleaje del mar el cual causa un pico entre 6 y 7 s de periodo en prácticamente todas las curvas de ruido sísmico realizadas para este trabajo. Este rasgo característico del oleaje puede cambiar de periodo o intensidad dependiendo de la época de año en que se registre o de las condiciones atmosféricas, un ejemplo de ello se muestra en las Figuras 4.8 y 4.9, en las cuales se muestran las curvas de ruido sísmico de dos estaciones instaladas cerca de la costa, la primera es la estación QUEM (El Quemado, Gro.) que está ~10 km de las costas del océano Pacífico y de Acapulco, Gro., la segunda estación que se muestra es SAPA (San Antonio del Paso, Hgo.), la cual se encuentra en el sur de Hidalgo, siendo la más cercana a las costas del Golfo de México para ese periodo de registro.

En la Figura 4.8 se puede observar cómo cuando el huracán DORA toca las costas de Guerrero, la curva correspondiente al 4 de julio del 2005 de la estación QUEM, así como todas las estaciones cercanas a las costas del océano Pacífico, muestra una disminución en el periodo correspondiente al oleaje y un aumento en la intensidad del ruido en periodos más bajos (~4 s), lo que corresponde a un oleaje de mayor frecuencia como resultado de éste. Algo muy similar a lo anteriormente descrito pasa con la curva registrada en la estación SAPA, y todas las cercanas a las costas del Golfo de México, cuando el huracán GERT toca las costas de Veracruz el 24 de julio del 2005.

Otro tipo de ruido meteorológico es el causado por el viento. Este ruido se genera cuando el empuje del viento causa la deriva de estructuras, el ruido puede presentarse en periodos cortos si el viento está afectando a estructuras pequeñas como árboles o edificios, o bien, en periodos más largos cuando afecta a estructuras de gran tamaño como lo son las montañas.

Los ejemplos más evidentes de este tipo de ruido se encuentran en las estaciones instaladas en la parte más cercana a las costas del Pacífico, y que además se encuentren en alguna de las laderas de un cerro o montaña. La Figura 4.10 muestra la ubicación de la estación XALT (Xaltianguis Gro.), la cual se encuentra en una escuela primaria como a 50 m de la carretera federal Chilpancingo-Acapulco cumpliendo con las características mencionadas anteriormente. Al obtener las curvas de ruido de este sitio encontramos que en los periodos largos las curvas tienden a mostrar una mayor intensidad en decibeles (Fig. 4.11).

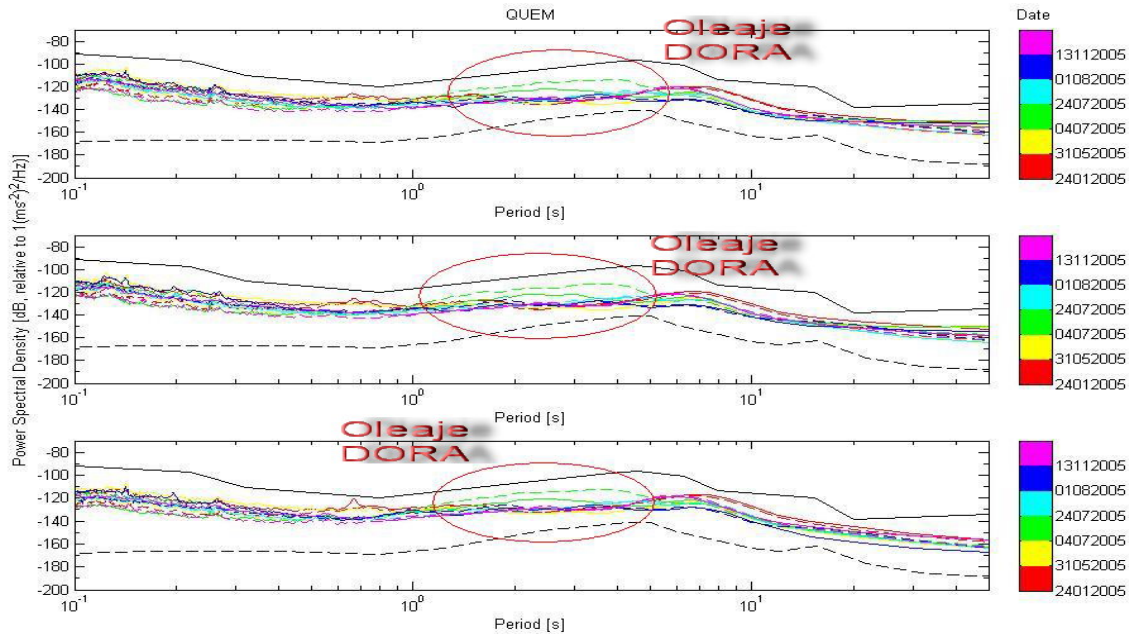


Figura 4.8: Curvas de ruido de la estación QUEM (El Quemado, Gro.). Se engloba la amplificación entre 1 y 5 s provocada por el oleaje cuando el huracán DORA toca las costas de Guerrero. A la derecha se muestra el código de colores utilizados para cada uno de los seis días de registro. Las líneas continuas representan el día y las punteadas la noche. La gráfica de la parte superior corresponde a la componente vertical z, la gráfica de en medio a la componente horizontal N-S y la grafica inferior a la componente horizontal E-W.

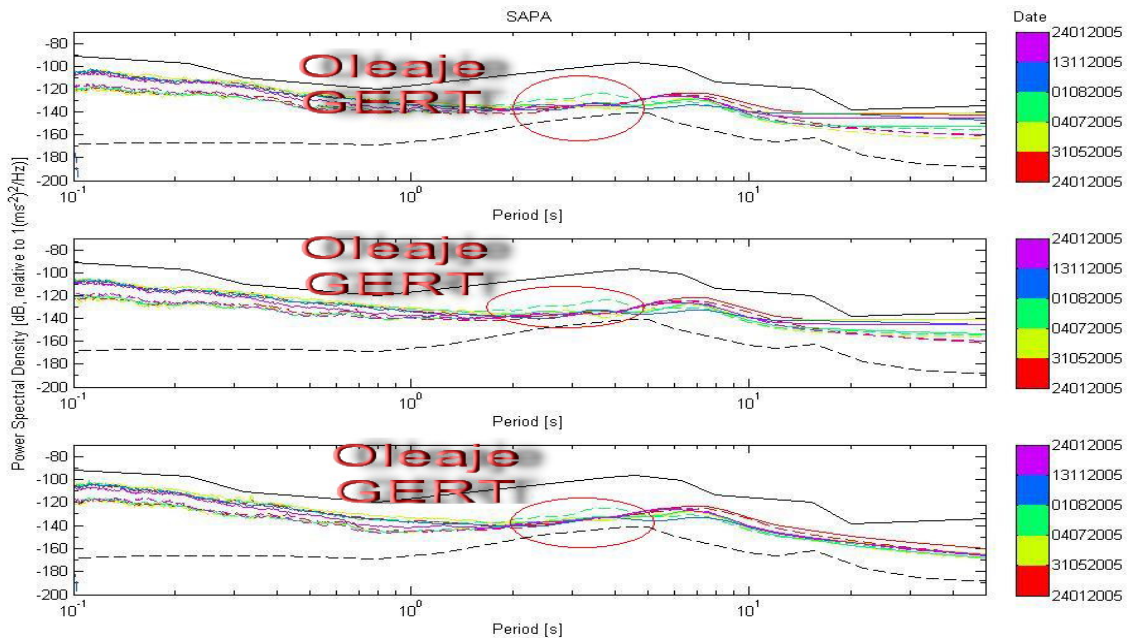


Figura 4.9: Curvas de ruido de la estación SAPA (San Antonio del Paso, Hgo.). Se engloba la amplificación entre 2 y 5 s provocada por el oleaje cuando el huracán GERT toca las costas del Golfo de México. A la derecha se muestra el código de colores utilizados para cada uno de los seis días de registro. Las líneas continuas representan el día y las punteadas la noche. La gráfica de la parte superior corresponde a la componente vertical z, la gráfica de en medio a la componente horizontal N-S y la grafica inferior a la componente horizontal E-W.

From Pos: -99.82182406, 16.79182474

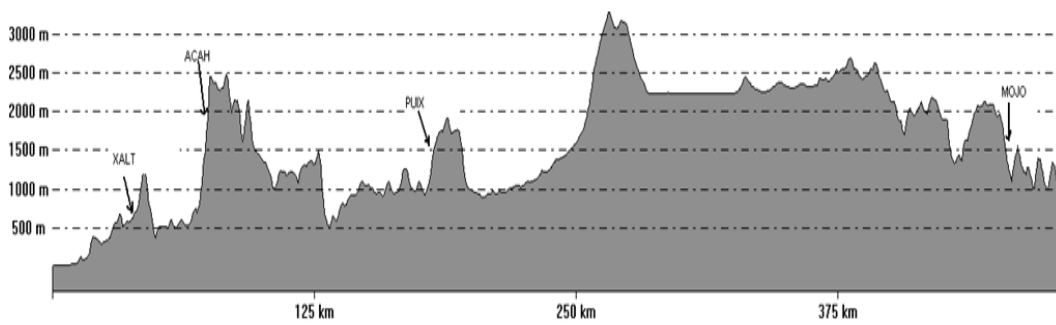


Figura 4.10: Relieve topográfico a lo largo de la línea MASE. Se muestra la ubicación de las estaciones XALT, ACAH, PUIX y MOHO (Modificada de Vladimir Kostoglodov).

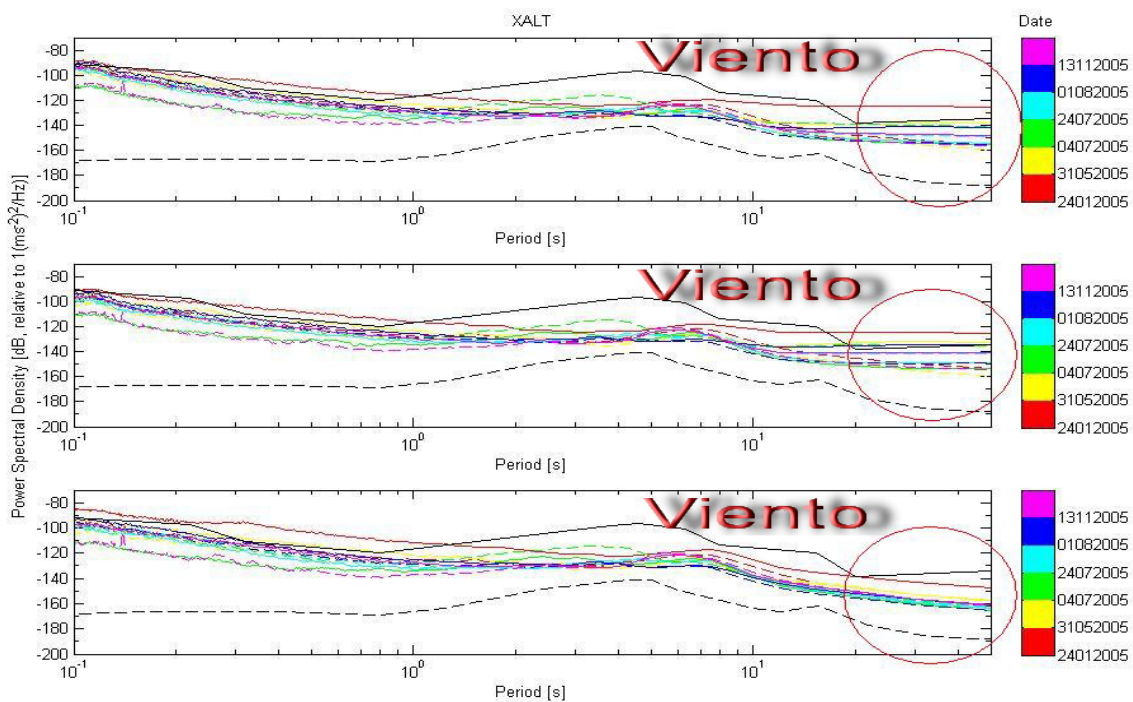


Figura 4.11: Curvas de ruido de la estación XALT (Xaltianguis Gro.). Se observa como las intensidad de la señal en largos periodos rebasa los parámetros propuestos por Peterson (1993) principalmente en las componentes N-S y Vertical, esto debido a la dirección con la que golpea el viento. A la derecha se muestra el código de colores utilizados para cada uno de los seis días de registro. Las líneas continuas representan el día y las punteadas la noche. La gráfica de la parte superior corresponde a la componente vertical z, la gráfica de en medio a la componente horizontal N-S y la grafica inferior a la componente horizontal E-W.

Se denomina ruido eléctrico a interferencias en las señales, de origen eléctrico y debido a variaciones de voltaje no deseadas y que están unidas a la señal principal de manera que la pueden alterar. Como la señal manejada dentro del sensor es analógica, el ruido será perjudicial en la medida que lo sea su amplitud respecto a la señal principal. Una vez que la señal entra en el digitalizador y ésta

se convierte en una señal digital, el ruido no es capaz de producir un cambio de estado en la señal, por lo que dicho ruido será irrelevante. Una de las características principales de este tipo de ruido, es que al momento de presentarse son muy constantes en el rango de frecuencias en el que afectan, por lo que aparecen como un pico muy delgado en las curvas de ruido. En la Figura 4.12 podemos observar un claro ejemplo de este tipo de ruido, el cual apreciamos como un pequeño “pico” de periodo casi constante en altas frecuencias.

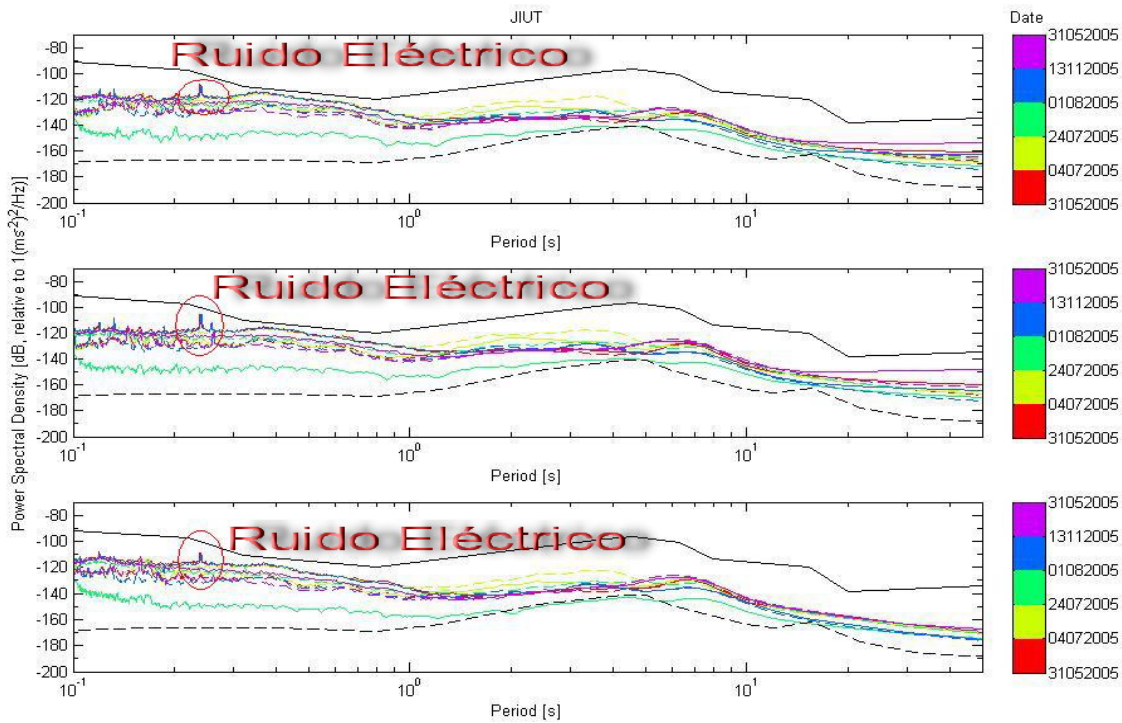


Figura 4.12: Curvas de ruido de la estación JIUT (Jiutepec, Mor.). Se observan los picos en periodos específicos ocasionados por el ruido electrónico. A la derecha se muestra una el código de colores utilizados para cada uno de los seis días de registro. Las líneas continuas representan el día y las punteadas la noche. La gráfica de la parte superior corresponde a la componente vertical z, la gráfica de en medio a la componente horizontal N-S y la grafica inferior a la componente horizontal E-W.

4.2.2. Propagación en la Línea MASE

El ruido sísmico de fondo está compuesto por ondas superficiales, propagándose en todas direcciones y con distintos modos de vibración. Con la finalidad de observar la propagación del ruido sísmico a través de la línea MASE se realizó una gráfica de ruido con los datos de cada una de las estaciones y ordenados según su posición en la línea. La Figura 4.13 muestra las gráficas de las componentes Vertical, Norte-Sur y Este-Oeste, en ellas se puede observar

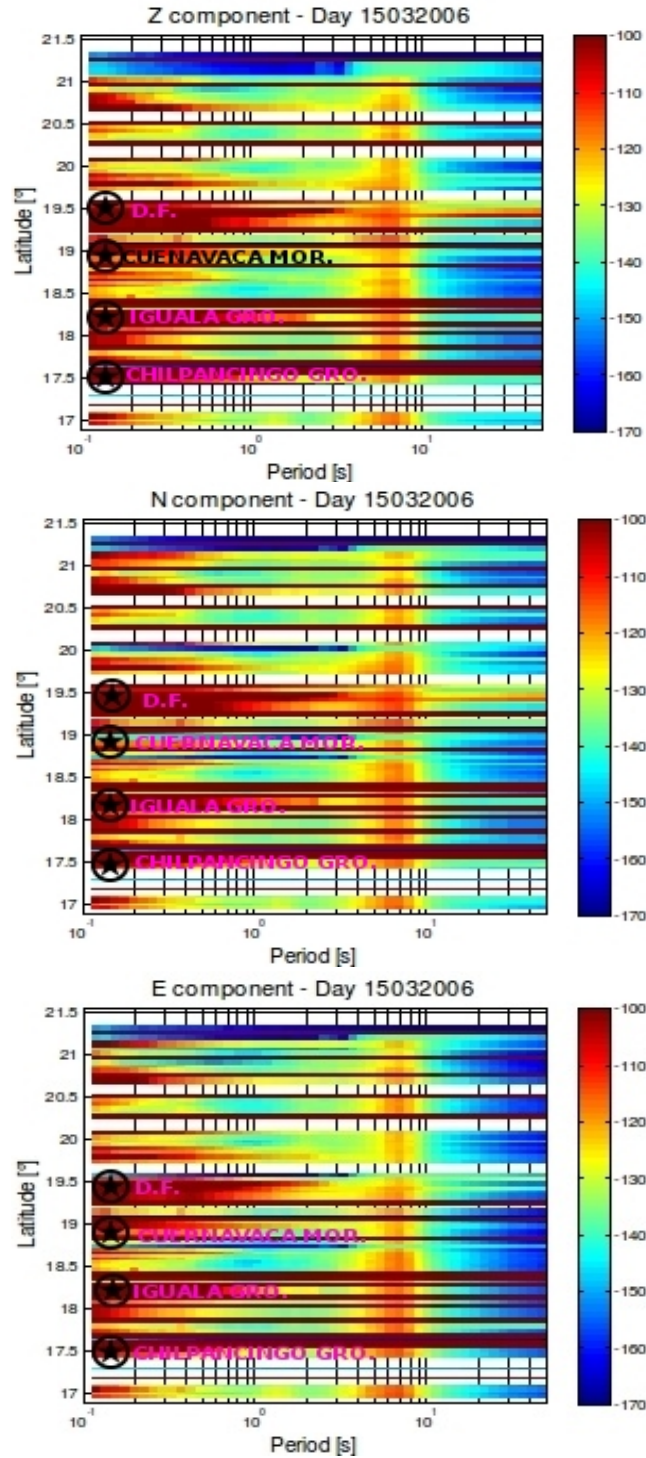


Figura 4.13: Espectrogramas de las tres componentes de todas las estaciones de la línea MASE (panel superior = componente Vertical, panel central = componente Norte-Sur, panel inferior = componente Este-Oeste). Cada línea horizontal corresponde a una de las estaciones, el color indica la intensidad de la curva de ruido en decibelios. Las latitudes marcadas con una estrella corresponden a las ciudades de Chilpancingo Gro., Iguala Gro., Cuernavaca Mor. y la ciudad de México. Nótese que algunas curvas están saturadas para el día de análisis, pudiendo ser por una falla en el instrumento.

claramente en el isoperiodo de 6-7 s que el nivel de ruido disminuye de intensidad conforme la latitud aumenta, esto es generado por la propagación del ruido provocado por el oleaje oceánico en las costas del Pacífico a través del territorio nacional. También se observa un incremento en periodos cortos en las latitudes correspondientes a las ciudades principales dentro de la línea MASE, como son Chilpancingo, Gro., Cuernavaca, Mor., el D. F. y Pachuca, Hgo.

Resulta obvio suponer que las estaciones que se encuentran en las zonas urbanas contendrían bastante ruido cultural, pero suponemos que aun así los datos que éstas registrarían serían de utilidad, para verificar esto se determinó cual sería la magnitud mínima que un sismo debería de tener para poder ser diferenciado del ruido cultural dentro de una de las estaciones MASE que se encontraban en el D.F. y área metropolitana (las estaciones más ruidosas del experimento MASE).

El ruido sísmico de fondo no tiene fases ni duración por lo que para realizar este análisis se utilizó el cálculo de la magnitud M_L , la cual necesita únicamente conocer la amplitud de la señal registrada por un sismómetro Wood Anderson. Para esto se utilizó la fórmula (obtenida por Ortega y Quintanar, 2005):

$$M_L = \log Amp_{WA} + 0.48 \log \left(\frac{r}{100} \right) + 0.0018(r - 100) + 3, \quad (4.1)$$

donde Amp_{WA} es la amplitud en milímetros de un sismograma de un Wood-Anderson y r es la distancia del epicentro a la estación. Esta ecuación tiene constantes calculadas solo para la cuenca de la Ciudad de México por lo que no pudimos hacer el cálculo de M_L para todo la línea del experimento MASE.

Con la ayuda del programa *Seismic Analysis Code* (SAC; Goldstein, 2003) se introdujo un filtro con la respuesta de instrumento de un Wood-Anderson para que la ecuación pudiera ser aplicada a nuestros datos.

Con lo anterior se obtuvieron gráficas en las se puede observar cuál sería la magnitud teórica mínima detectable por las estaciones que se encontraban instaladas en la Ciudad de México (Apéndice 2). En la Figura 4.14 se muestra como ejemplo a la estación MULU, instalada dentro del Museo de la Luz a unos metros del Zócalo de la Ciudad de México, el cual evidentemente se encuentra en zona de lago y tiene una intensa actividad humana durante todo el día, por lo que es de las estaciones más ruidosas del proyecto MASE.

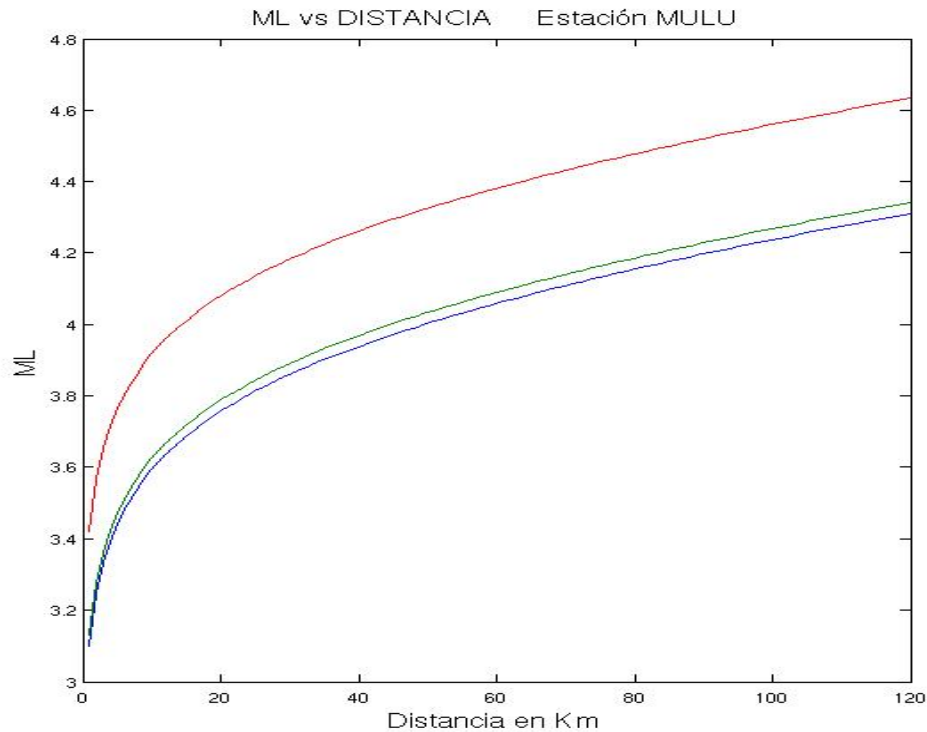


Figura 4.14: Curvas de Magnitud local para la estación Mulu (Museo de la Luz, D.F.). Cada una de las líneas corresponde a una de las componentes del sensor: Rojo = componente V, Azul = componente N-S, Verde = componente E-W. En el eje de las abscisas tenemos las distancias en kilómetros y en el eje de las ordenadas tenemos indicada la magnitud local mínima detectable.

Como se ve en la gráfica, para esta estación, un sismo que tuviera lugar justo debajo de ella, tendría que tener por lo menos una M_L de 3.2 para que pudiéramos diferenciarlo de nuestra señal, de lo contrario la amplitud del ruido sísmico de fondo sobrepasaría a la de nuestra señal enmascarando nuestro evento.

En la Figura 4.15 se muestra las M_L calculadas para toda la Ciudad de México, incluyendo el área metropolitana. Para ello se supuso que se contaba con todas las estaciones dentro de la Ciudad de México, por lo que las magnitudes mínimas mostradas son tomando en cuenta a todas las estaciones de esa región. Claramente se aprecian dos semicírculos los cuales muestran según la escala de colores que las estaciones que se encuentran más al Norte de la ciudad necesitan de sismos de mayor magnitud respecto a las estaciones que se encuentran instaladas al Sur de la ciudad, esto es debido a que las estaciones del Sur están en “zona de loma” además de que las estaciones del Norte son más ruidosas.

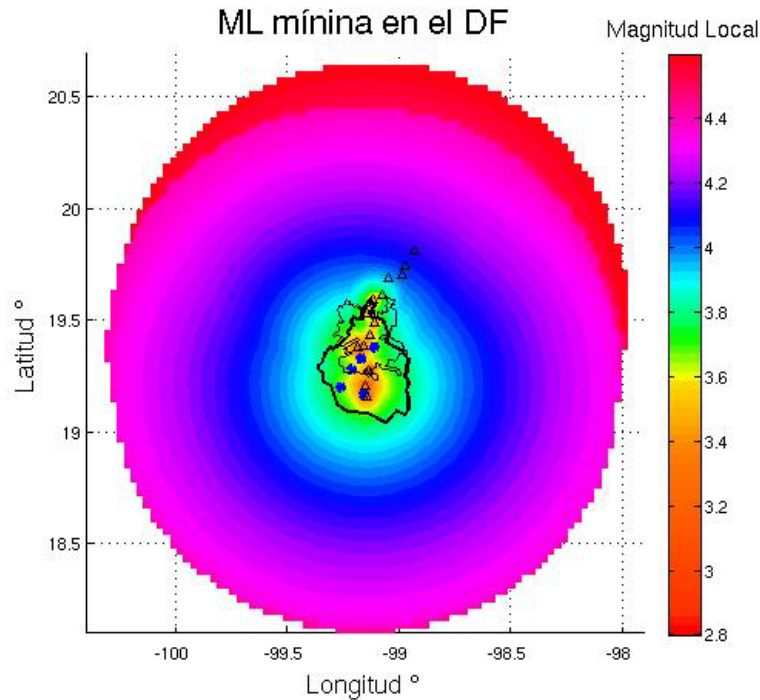


Figura 4.15: Magnitud M_L mínima detectable por las estaciones en la Ciudad de México. Muestra los niveles de detección hasta 120 km a partir de cada una de las estaciones. Los niveles de M_L más bajos en el sur indican que las estaciones que se encuentran instaladas fuera de la mancha urbana registran menores niveles de ruido sísmico de fondo.

La Figura 4.16 muestra un acercamiento de la zona. Se pueden observar claramente varias zonas en las que las magnitudes que pueden ser detectadas son cercanas a 2.8 en el sur de la ciudad, correspondiendo a estaciones en la “zona de loma” dentro del D.F. Se pueden observar otras magnitudes un poco más elevadas al norte de la ciudad. Nótese además que aquéllas en la parte sur de la ciudad también se pueden observar a una mayor distancia.

La Figura 4.17 muestra el registro de dos estaciones que pertenecieron al proyecto MASE y que se instalaron en la Ciudad de México: MULU (Museo de la Luz, col. Centro, Cuauhtemoc) y TONI (San Miguel Topilejo, Xochimilco). También se muestra en la figura el registro corresponde a un evento sísmico de 3.4 grados de magnitud con epicentro en la ciudad de México (19.38°N 99.11°W) el 28 de febrero del 2006 a las 23:58 (hora GMT). Claramente se nota como los niveles de ruido enmascaran la señal del evento sísmico en la estación MULU, a pesar de que se encuentra más cercana al epicentro, a diferencia de la estación TONI que se encuentra en la denominada “zona de loma” del Distrito Federal tiene niveles de ruido mucho más bajos dejando ver claramente la señal del evento sísmico.

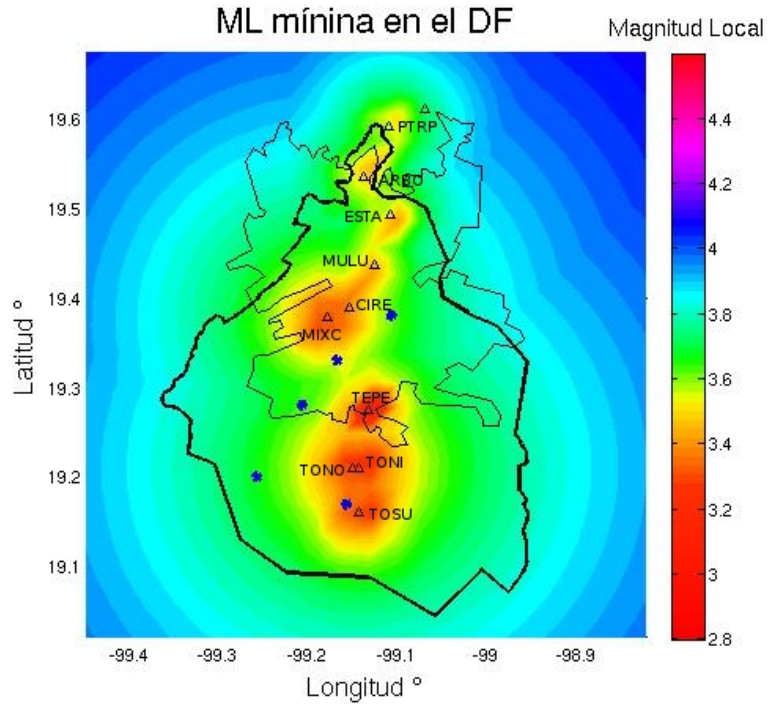


Figura 4.16: Magnitud M_L mínima detectable por las estaciones en la Ciudad de México. En colores se indican las magnitudes M_L a partir de las que un sismo puede ser diferenciado del ruido sísmico de fondo. Se muestran el contorno del D.F. en línea negra gruesa y la delgada al norte del D.F. indica la extensión de la mancha urbana de la Ciudad de México. Los triángulos pequeños muestran las ubicaciones de cada una de las estaciones del proyecto MASE que se encontraban instaladas dentro del D.F. y zona metropolitana, los puntos azules corresponden a pequeños sismos ($3.2 \leq M_L \leq 4$) que ocurrieron dentro del D.F. mientras el proyecto estuvo en operación.

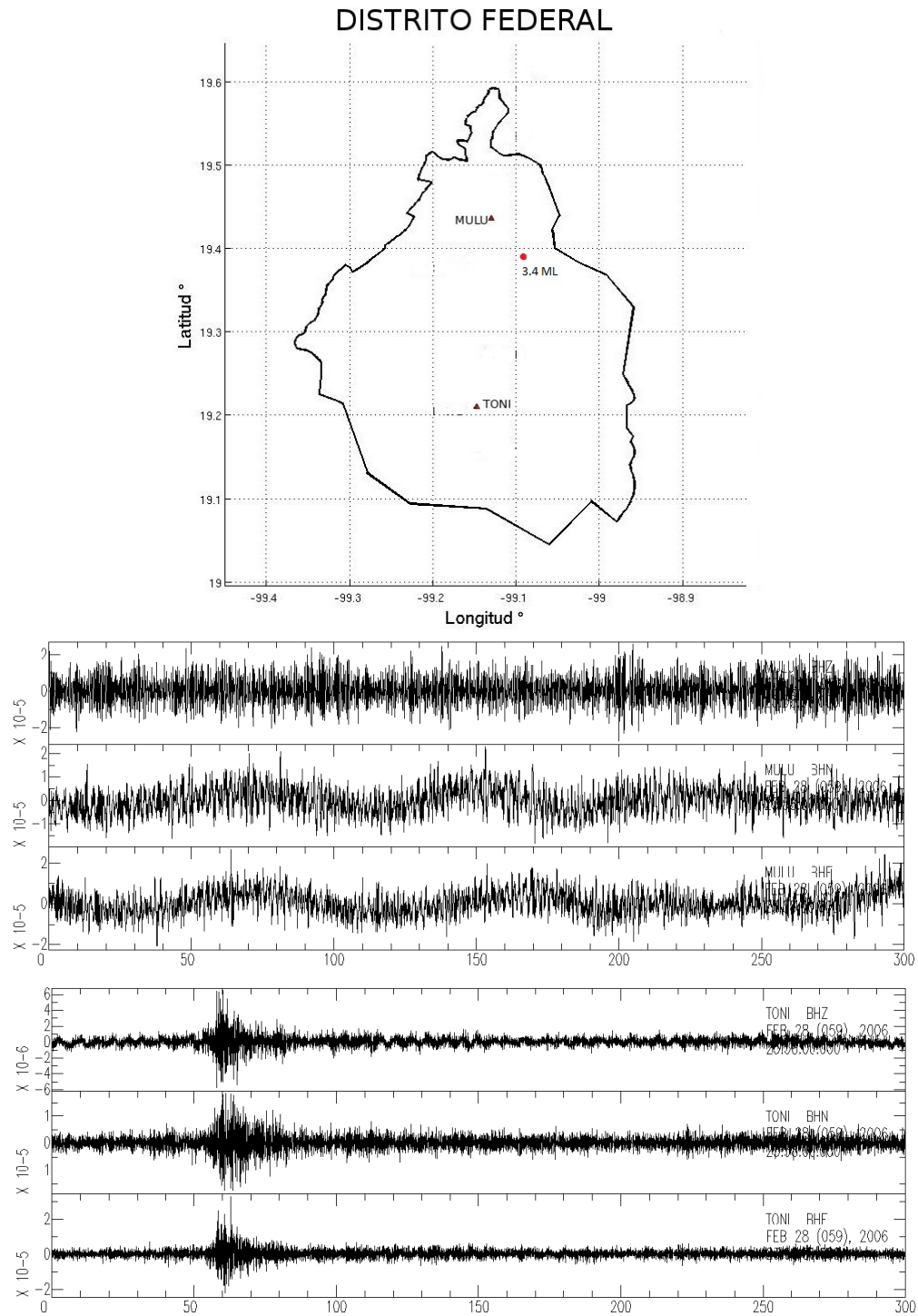


Figura 4.17: Arriba: Localización de estaciones MULU y TONI y del sismo del 28 de febrero de 2006. Centro: Registros de la estación MULU. Abajo: Registros de la estación TONI.

CAPÍTULO 5. Discusiones y conclusiones.

Para poder realizar la caracterización de las curvas de ruido del experimento MASE se tomaron en cuenta las posibles fuentes de ruido cercanas a cada estación, así como los rangos de frecuencias en los que podría afectar a nuestra señal y los periodos de día en los que era más susceptible a encontrarse determinado tipo de ruido generado por la posible fuente.

Se pudo observar el efecto de las tormentas y huracanes en las curvas de ruido, ya que estas aumentan la frecuencia del oleaje así como su fuerza causando que el “pico” característico del oleaje se desplace hacia periodos más cortos.

En las estaciones que se encontraban en alguna de las laderas de las montañas que componen la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Oriental, se encontró que el viento acoplado con estas enormes estructuras ocasiona que en nuestras curvas observemos niveles ruido elevado en los periodos más largos que registramos.

En varias estaciones se pudo observar un alto contenido de ruido de periodos cortos, el cual se atribuye principalmente al ruido cultural generado en las poblaciones en donde los equipos fueron instalados ya que se notaron diferencias muy marcadas entre los niveles de ruido durante el día y la noche.

Se logró observar ruido de origen electrónico en algunas estaciones; aunque este tipo de ruido no afecta mucho a la señal original ya que por su origen este tipo de ruido tiene un periodo muy constante y fácilmente puede ser eliminado con la ayuda de un filtro.

Para poder ejemplificar qué tanto afectan los altos niveles de ruido cultural se calculó la M_L mínima que podía ser registrada en las estaciones que se encontraban instaladas en la Ciudad de México y el área metropolitana, que es en donde se registraban los mayores niveles de ruido de este tipo, encontrando que hay una gran diferencia entre las estaciones que se encontraban instaladas en la zona de loma respecto a las instaladas en la zona de lago y se determino que en general la M_L mínima que se podía detectar con estas estaciones fue de 2.8.

A pesar de que la mayoría de las estaciones del proyecto MASE se instalaron sobre suelo “blando” y cerca de fuentes de ruido cultural, como lo son, escuelas o instituciones, carreteras o en medio de poblaciones, se observó que los niveles del ruido sísmico a lo largo de toda la línea son bastante aceptables.

La utilidad de los datos sísmicos es mucho mayor cuando los niveles de ruido son bajos; sin embargo, es posible maximizar ésta con una buena comprensión y cuantificación del ruido sísmico, siendo necesario realizar el análisis de los niveles de ruido sísmico en estaciones de registro.

Gracias a estudios como éste, sabemos que el ruido sísmico de fondo está presente en todos los registros sísmicos y que afecta o enmascara las señales sísmicas de interés de diferentes estudios.

Referencias

Bracewell, R. N. (1986). "The Fourier transform and its applications". MacGraw-Hill, Inc., EEUU, 464 pp.

Brune and Oliver, (1959). "The seismic noise of the Earth's surface". *Bull. Seismol. Soc. Am.* **49** (1959), pp. 349–353.

Cifuentes Lemus, J. L., P. Torres-García y M. M. Frías (1997) "El océano y sus recursos". Fondo de cultura económica. Segunda edición (La Ciencia para Todos), 1997. 109 pp.

Flores, H. C. (2004). "Método SPAC: Una alternativa para la estimación de modelos de velocidades en el Valle de México". Tesis de Maestría, Posgrado de Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM. 106 pp

Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo y L. Minner (2003) "SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to "The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology", Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.

Husker, A., I. Stubailo, M. Lukac, V. Naik, R. Guy, P. Davis y D. Estrin (2008), "WiLSoN: The Wirelessly Linked Seismological Network and its application in the MesoAmerican Seismic Experiment", *Seismological Research Letters*, 79 (3): 438-443.

Klotz, O. (1908). "Microseisms", *Journal of de Royal Astronomical Society of Canada*, Vol. XI, n. 4, Pag 195-208.

Macnamara D. E. y P. Raymond (2004). "Buland. Ambient Noise Levels in the Continental United States". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 4, pp. 1517–1527.

Moreno, J. y C. Alfaro (2000). "De los microsismos a los microtemblores". VIII Congreso Colombiano de Geociencia 2000 – Sociedad Colombiana De Geotecnia.

Peterson, J. (1993). Observations and modeling of seismic background noise. 12 pp.

Ramírez, E. (1939). "An experimental investigation of the nature and origin of microseisms at St. Louis, Missouri", *Bulletin of the seismological society of America*. Vol. 29, pp. 139-178

Ortega, R. y L. Quintanar (2005). "A Study of the Local Magnitude Scale in the Basin of Mexico: Mutually Consistent Estimates of log A0 and Ground-Motion Scaling". *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 2, pp. 605–613.

Solano Hernández, E. A. (2006). "Evaluación del efecto de sitio en estaciones de banda ancha del Servicio Sismológico Nacional". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. 137 pp.

Stein, S. y M. Wyession (2003). "An introduction to seismology, earthquakes and earth structure", Blackwell publishing, EEUU. 485 pp.

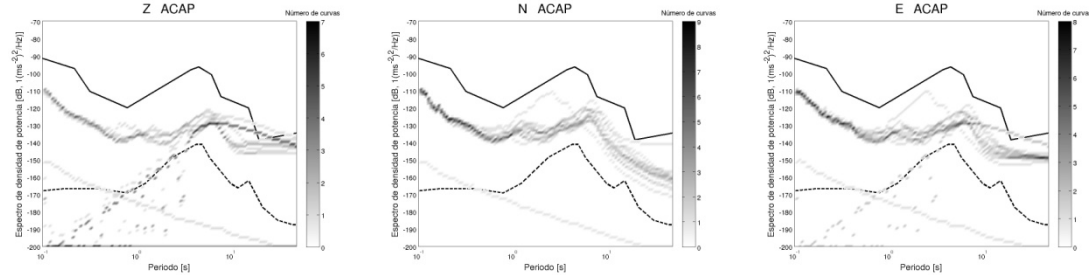
Udías, A. (1971), "Introducción a la sismología y estructura interna de la Tierra". Taller del I. G. y C., Madrid, España. 163 pp.

Whipple, F. J. W. y A. W. Lee (1935). "Notes on the theory of microseisms, Monthly Not Of the Roy". *Astron. Soc., geoph. Suppl.*, Vol. 3.

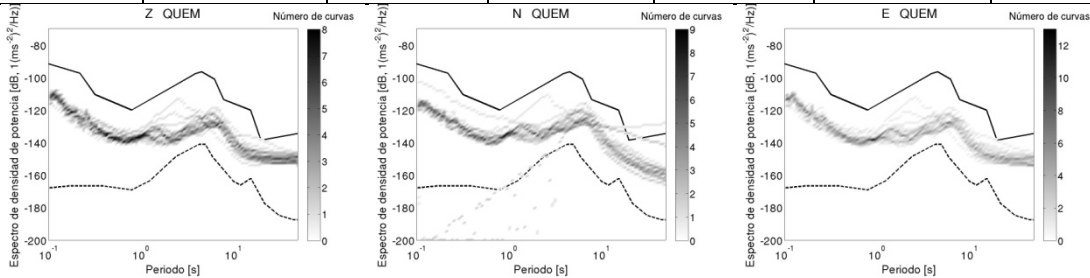
Zanon, F.S. (1938). "I microseismi registrati in Venezia causati da cicloni sull'Atlantico e sull'Adriatico", *Bolletino della Societa Sismologica Italiana*, Vol. 35, Pag 219-226.

APENDICE 1. Distribución de probabilidades de las curvas de densidad de potencia.

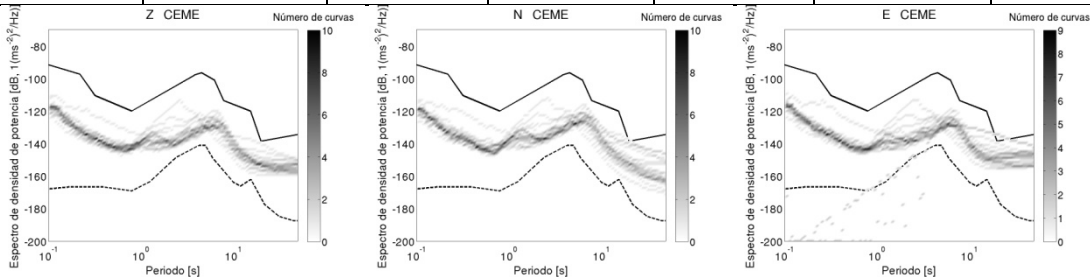
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ACAP	Acapulco Gro.	16.884	-99.8494	156	Secundaria Miguel Hidalgo y Costilla	Alto en periodos largos.



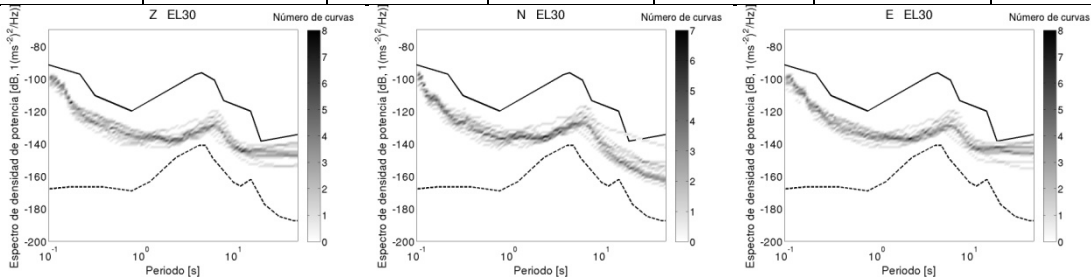
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
QUEM	El Quemado Gro.	16.936	-99.8237	49	Telesec. Naciones Unidas	Dentro de los límites normales



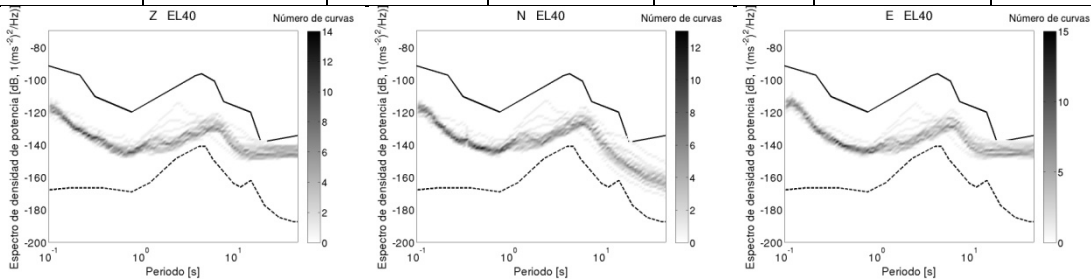
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CEME	El Cementerio Gro.	16.9735	-99.808	140	Cementerio	Dentro de los límites normales



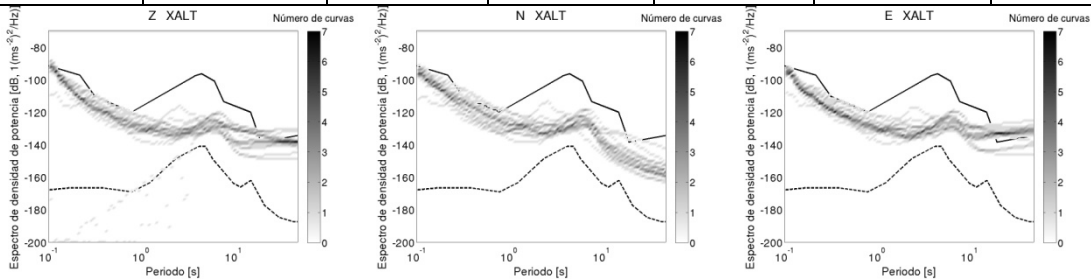
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
EL30	EI 30 Gro.	17.0037	-99.7817	274	Escuela	Dentro de los límites normales



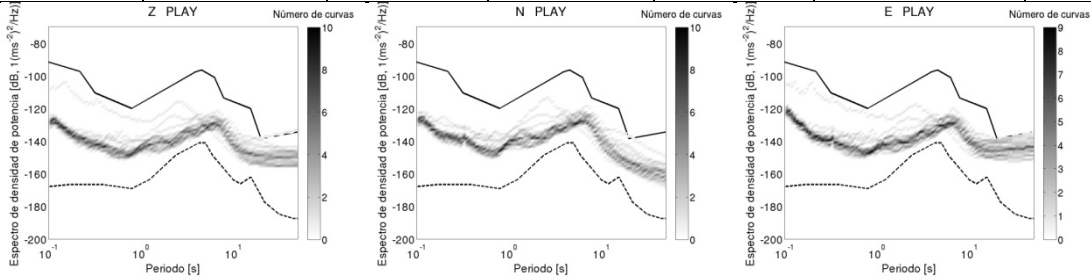
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
EL40	EI 40 Gro	17.0542	-99.7638	453	Escuela	Dentro de los límites normales



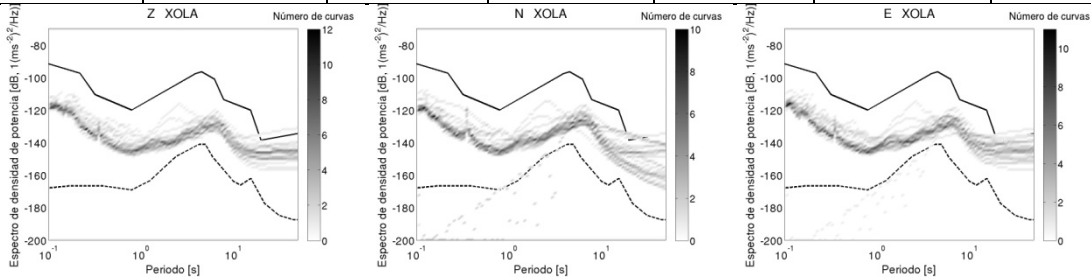
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
XALT	Xaltianguis Gro.	17.0992	-99.7124	536	Primaria Federal 1 de Mayo	Alto en periodos largos.



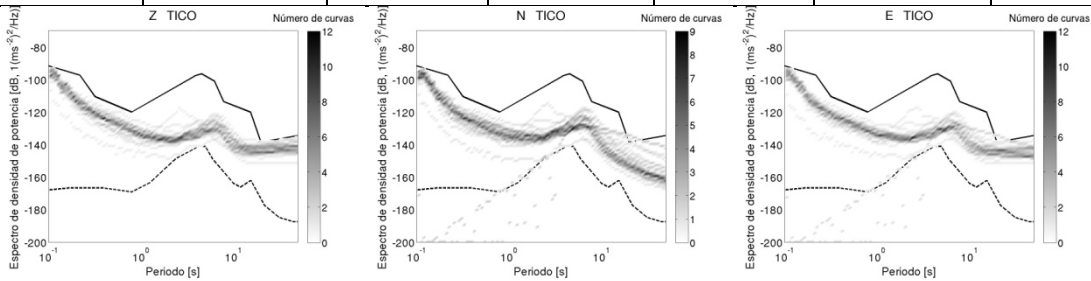
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PLAY	El Playón Gro.	17.1239	-99.6701	408	Telesecundaria Niños Héroes	Alto en periodos largos.



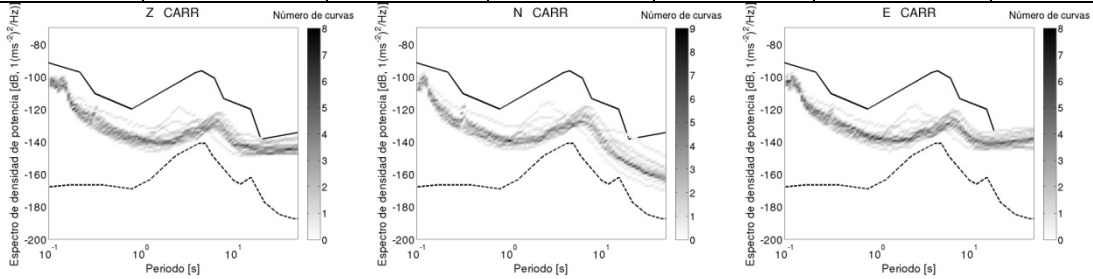
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
XOLA	Xolapa Gro.	17.1612	-99.6167	246	Terreno ejidal	Alto en periodos largos.



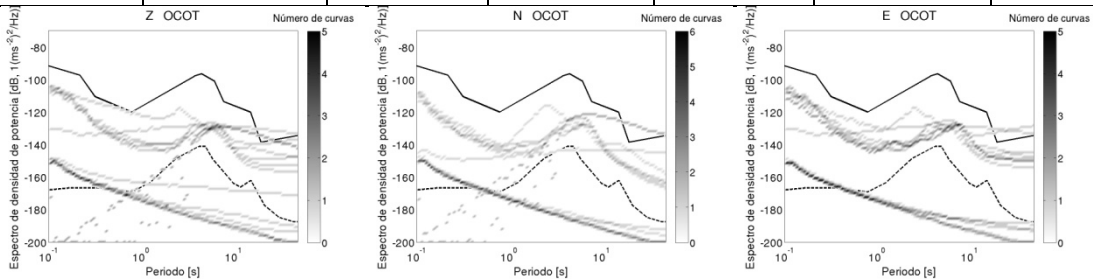
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TICO	Tierra Colorada Gro.	17.1725	-99.5432	315	Secundaria Juan de la Barrera	Alto en periodos largos.



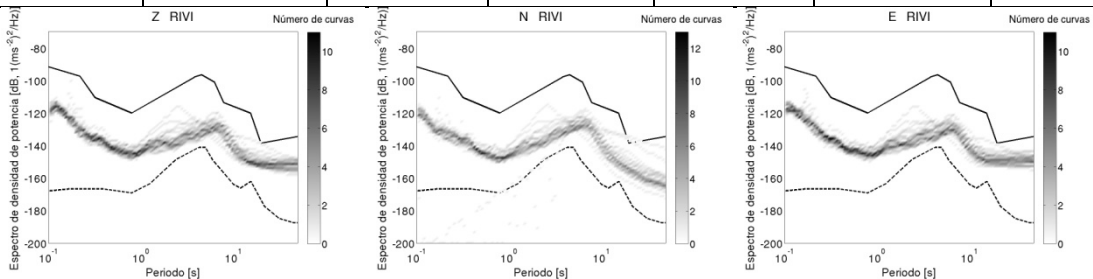
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CARR	El Carrizal Gro.	17.2065	-99.5109	584	Terreno	Alto en periodos largos.



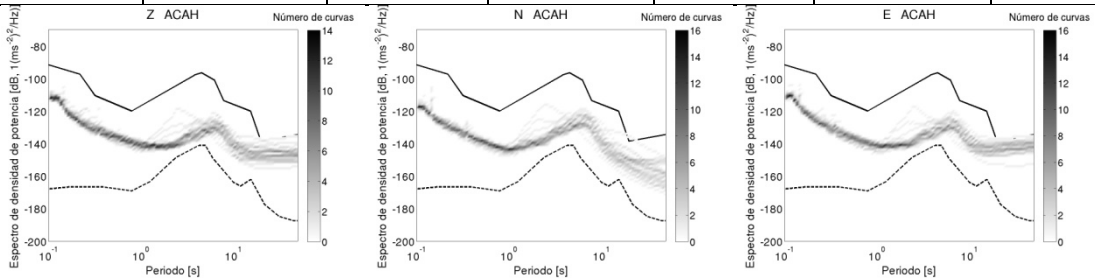
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
OCOT	El Ocotito Gro.	17.2527	-99.5059	725	Centro Regional de Educación Primaria	Dentro de los límites normales



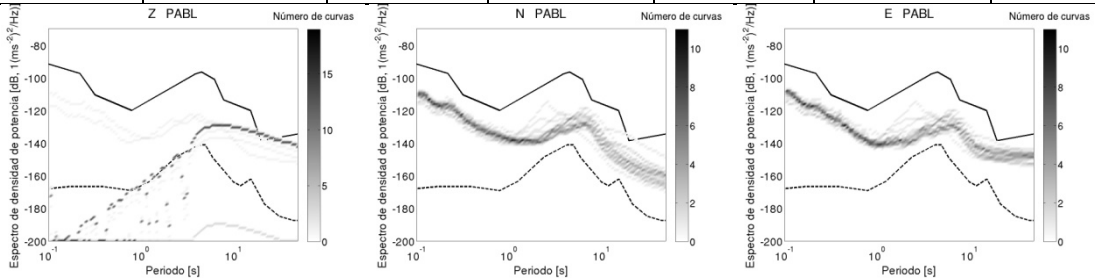
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
RIVI	Rincón de la vía Gro.	17.2892	-99.4859	736	Rancho	Dentro de los límites normales



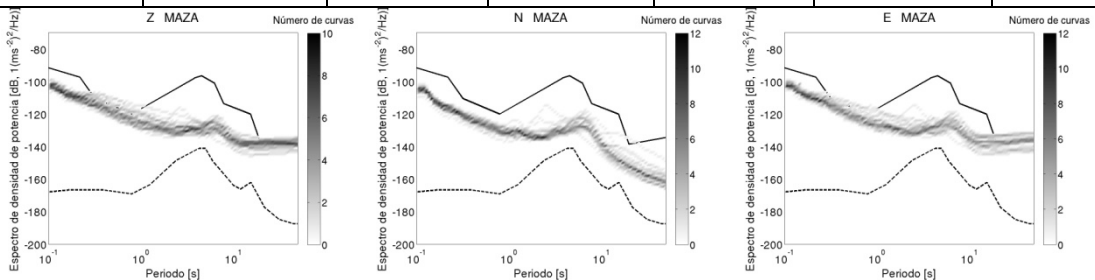
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ACAH	Acahuizotla Gro.	17.3621	-99.4682	844	Jardín de niños José Ma. Morelos y Pavón	Alto en periodos largos.



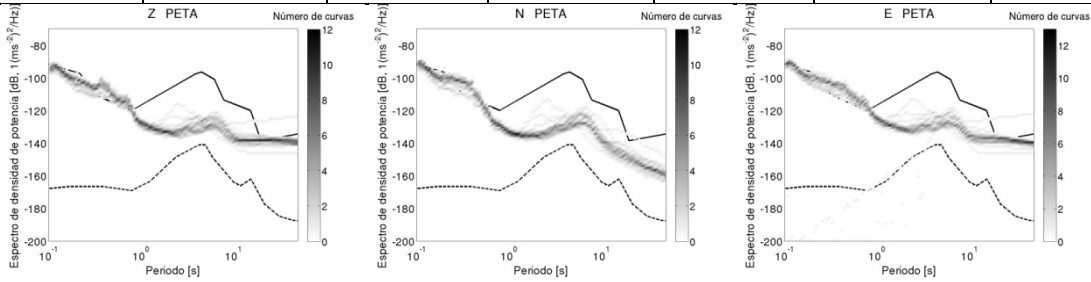
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PABL	Palo Blanco Gro.	17.4043	-99.4688	1236	Casa particular.	Dentro de los límites normales. Falla en comp z



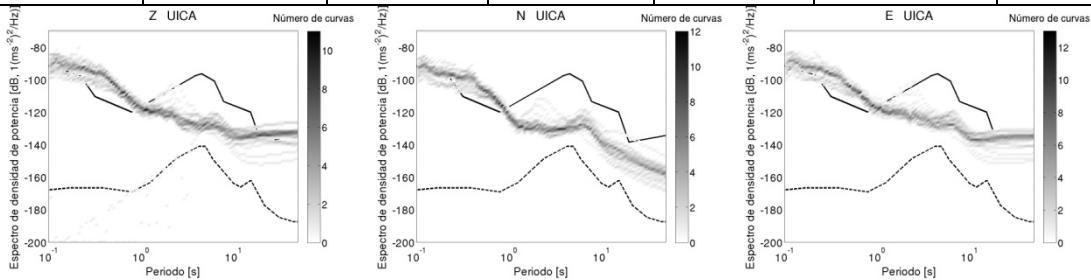
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
MAZA	Mazatlán Gro.	17.4359	-99.4631	1309	Jardín de Niños Educadora Guerrerense	Alto en periodos largos.



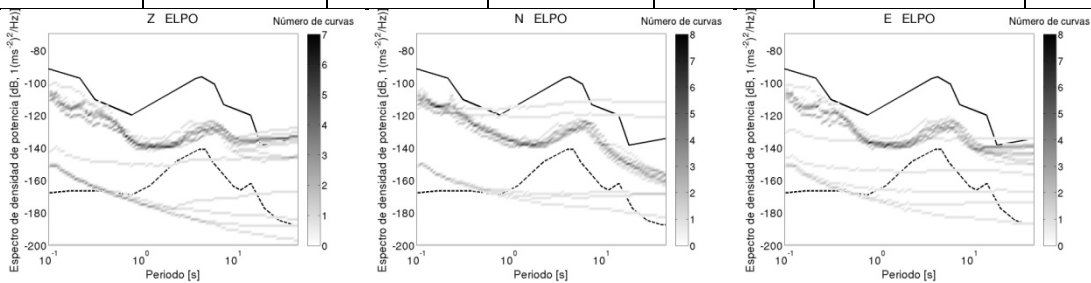
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PETA	Petaquillas Gro.	17.4768	-99.4589	1183	Secundaria Técnica #80 Australia	Alto en periodos largos y peeriodos cortos.



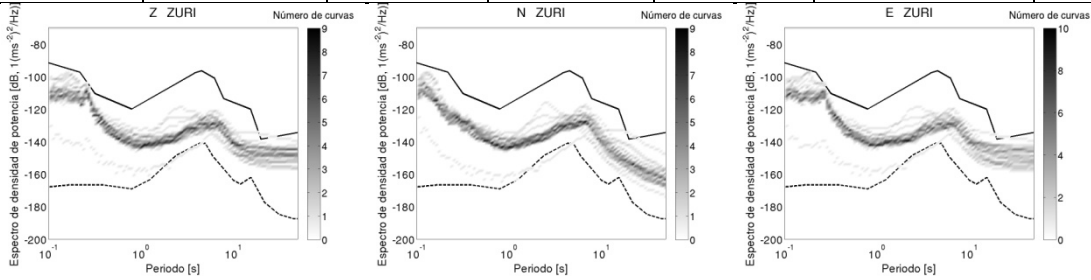
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
UICA	Chilpancingo Gro.	17.5215	-99.4925	1211	Universidad Sentimientos de la Nación	Alto en periodos largos y peeriodos cortos.



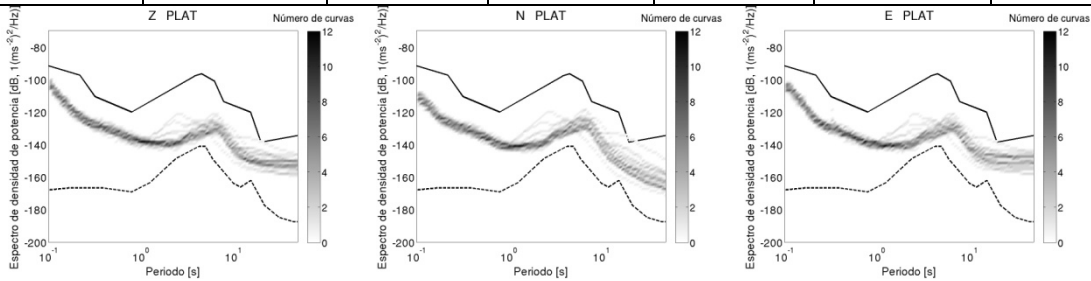
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ELPO	El Polvorín Gro.	17.5939	-99.5152	1431	Telesecundaria Octavio Paz	Alto en periodos largos.



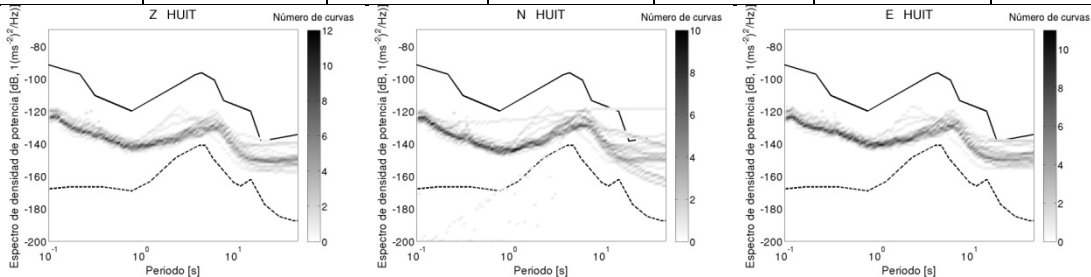
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ZURI	Zumpango del Río Gro.	17.6466	-99.5186	1070	Unidad Académica Preparatoria#36	Dentro de los límites normales



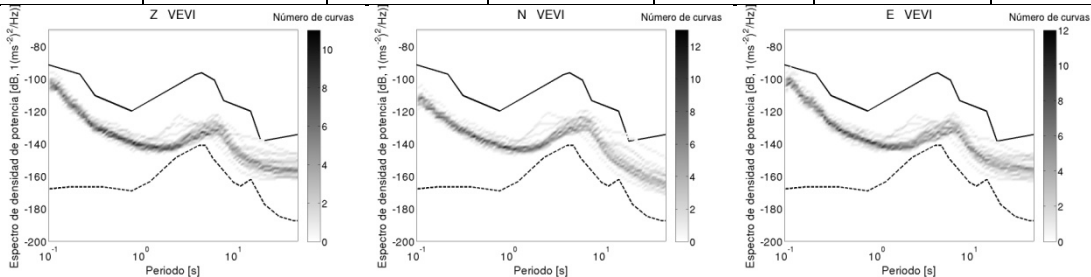
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PLAT	El Platanal Gro.	17.6954	-99.5362	953	Casa	Dentro de los límites normales



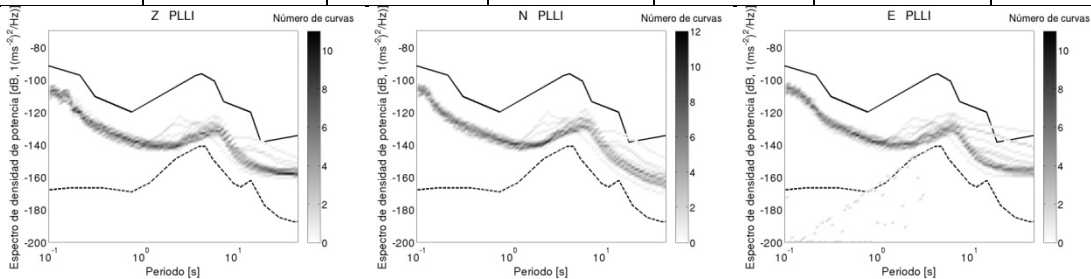
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
HUIT	Huitzitepec Gro.	17.7421	-99.4838	1352	Secundaria	Dentro de los límites normales



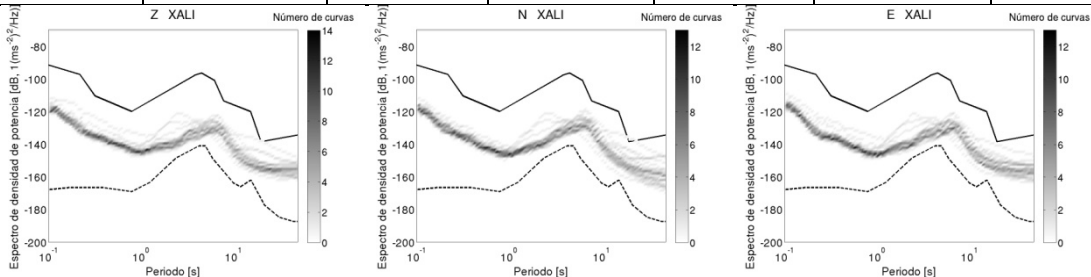
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
VEVI	Venta Vieja Gro.	17.8188	-99.562	677	Iglesia	Dentro de los límites normales



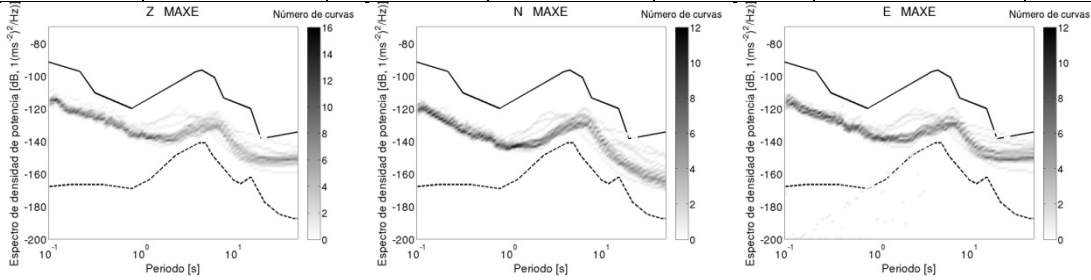
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PLLI	Plan de Liebres Gro.	17.8674	-99.5732	590	Terreno ejidal	Dentro de los límites normales



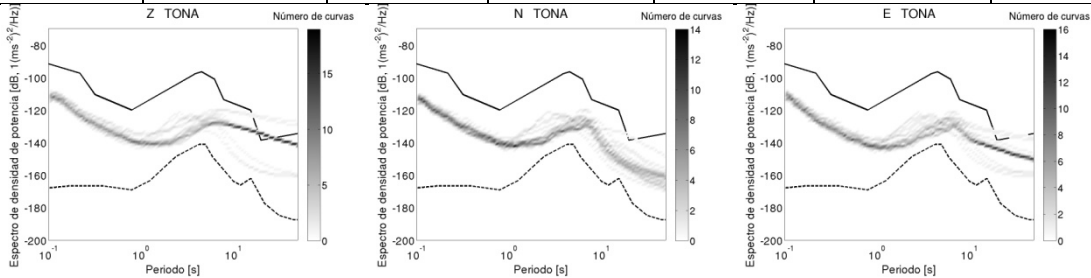
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
XALI	Xalitla Gro.	17.9989	-99.547	585	Primaria Federal de Mayo 1	Dentro de los límites normales



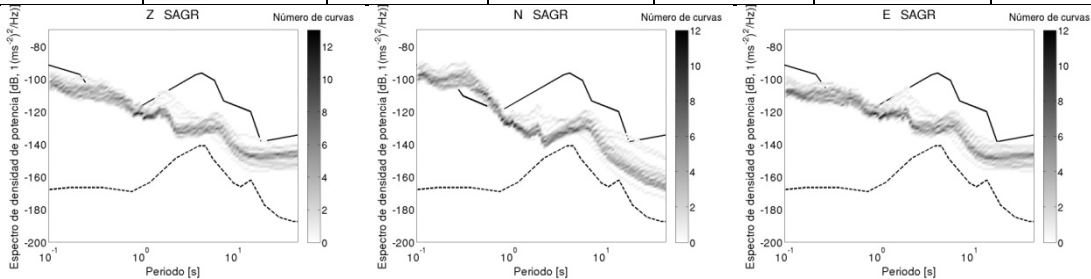
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
MAXE	Maxela Gro.	18.0504	-99.5948	1019	Telesecundaria Cuautémoc	Dentro de los límites normales



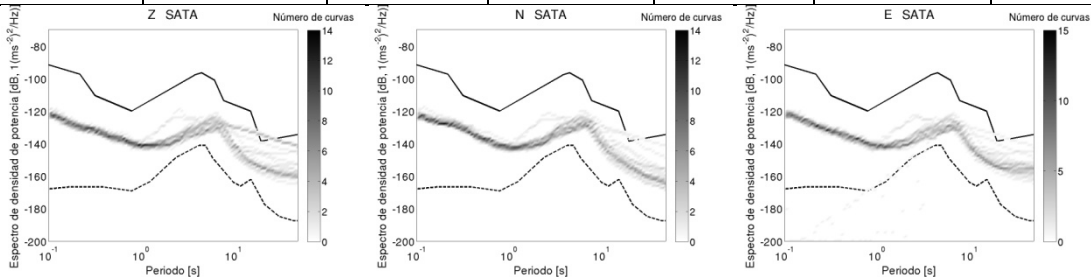
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TONA	Tonalapa del Sur Gro.	18.0955	-99.5611	727	Primaria Fco. Madero Y	Dentro de los límites normales



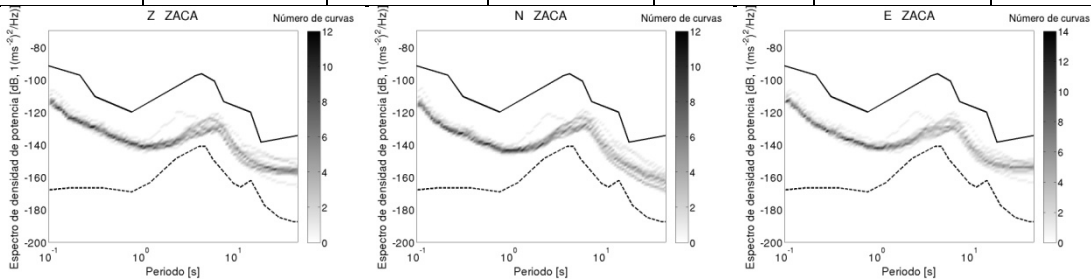
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SAGR	Sabana Grande Gro.	18.163	-99.5507	761	Sec. Técnica Ignacio Manuel Altamirano	Alto en periodos cortos



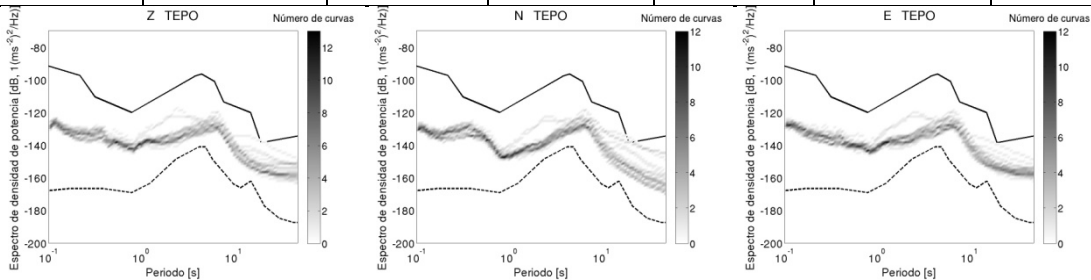
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SATA	Santa Teresa Gro.	18.236	-99.512	829	Escuela secundaria	Dentro de los límites normales



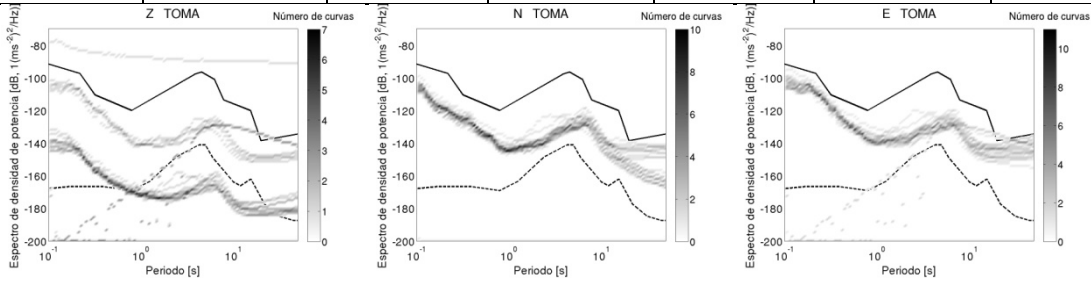
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ZACA	Zacacoyuca Gro.	18.2574	-99.5296	904	Bodega Conasupo	Dentro de los límites normales



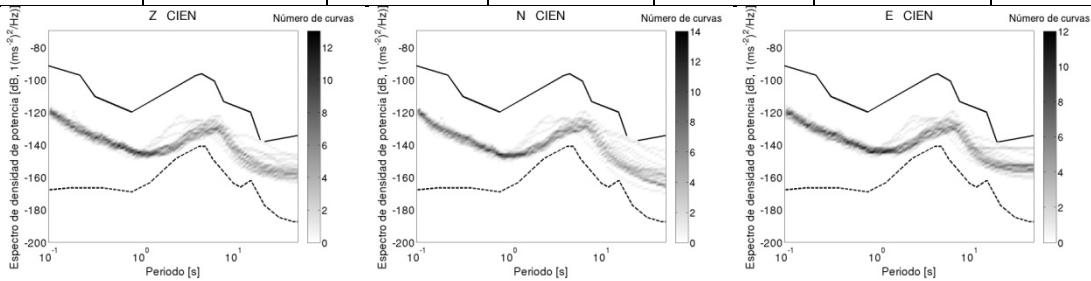
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TEPO	Tepochica Gro.	18.2976	-99.5169	920	Sec. Técnica 212 Gral. Lázaro Cárdenas del Río	Dentro de los límites normales



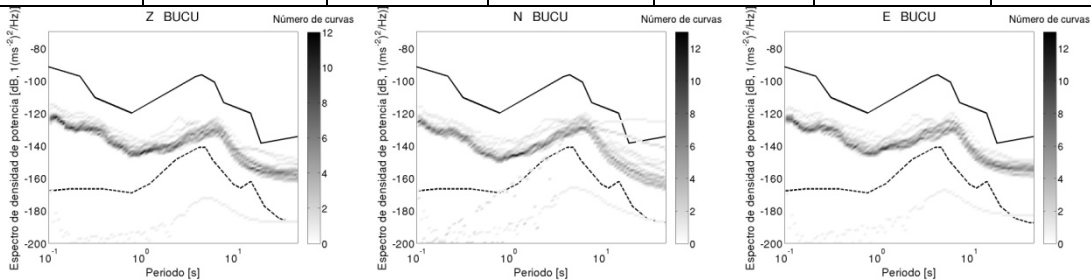
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TOMA	Tomatal Gro.	18.3269	-99.4935	786	Primaria Ignacio Manuel	Alto en periodos largos. Problemas con z.



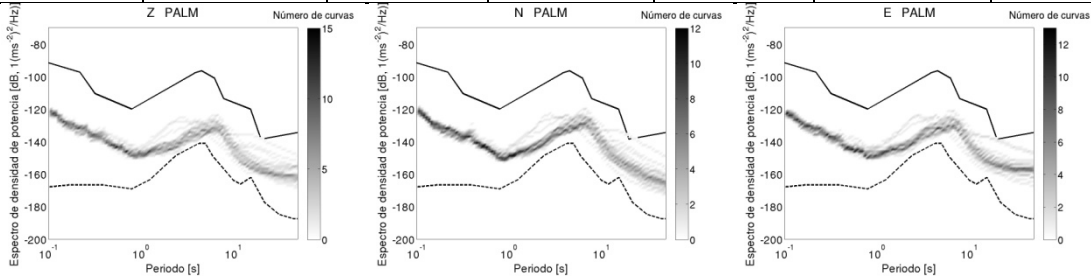
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CIEN	Cieneguillas Gro.	18.4128	-99.4753	1088	Rancho	Dentro de los límites normales



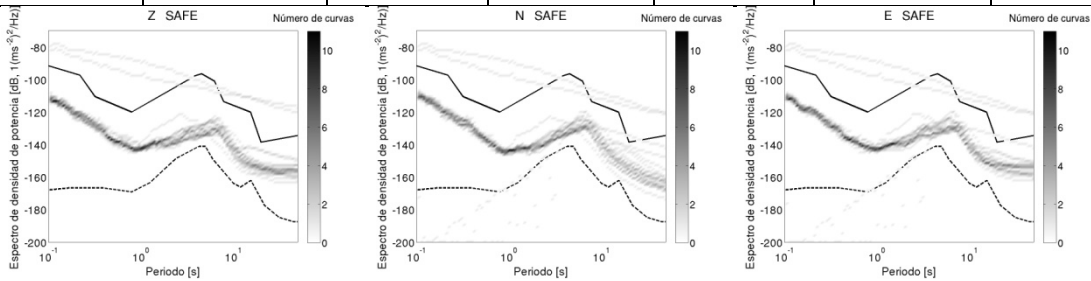
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
BUCU	Buena Vista de Cuellar Gro.	18.4654	-99.4145	1283	Primaria Zona Escolar 5	Dentro de los límites normales



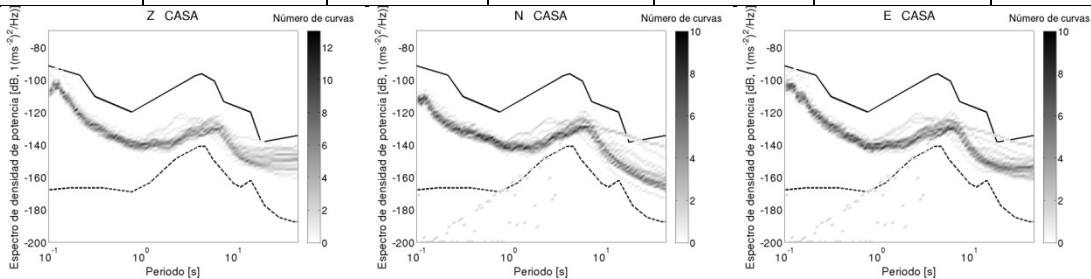
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PALM	Palmillas Gro.	18.5207	-99.4299	1130	Rancho	Dentro de los límites normales



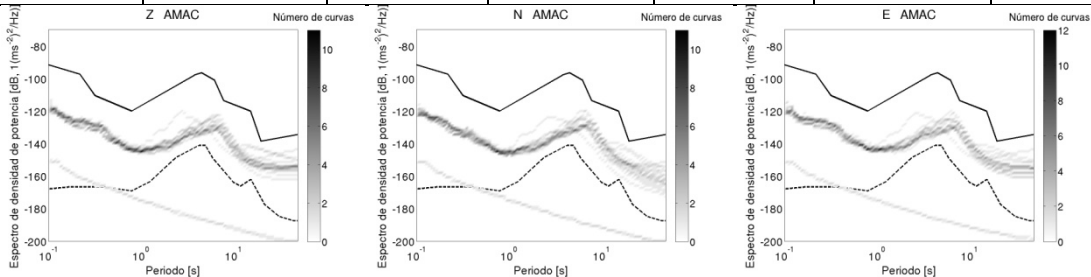
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SAFE	Santa Fe de Tepetlapa Gro.	18.5515	-99.425	1056	Rancho	Dentro de los límites normales



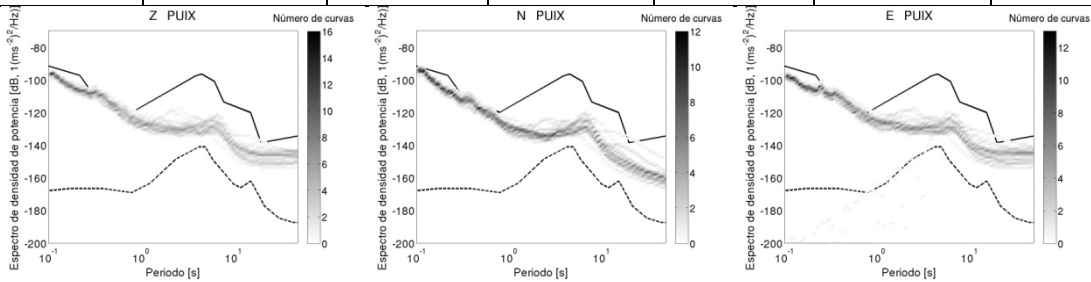
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CASA	Casahuatlán Mor.	18.5756	-99.3812	941	Terreno	Dentro de los límites normales



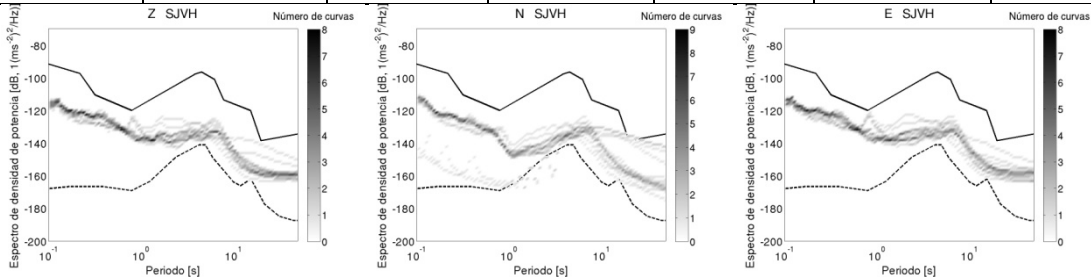
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
AMAC	Amacuzac Mor.	18.6001	-99.3859	942	Jardín de Niños Aurora	Dentro de los límites normales



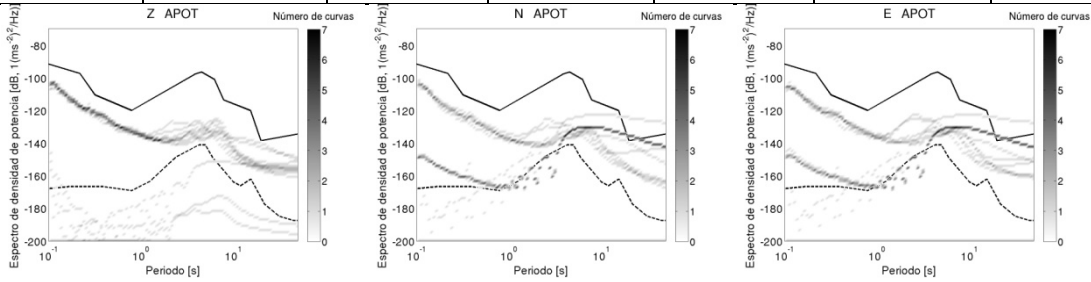
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PUIX	Puente de Ixtla Mor.	18.6257	-99.3209	897	Prepa 5 Universidad Nacional Autónoma del Edo. De Morelos	Alto en periodos cortos



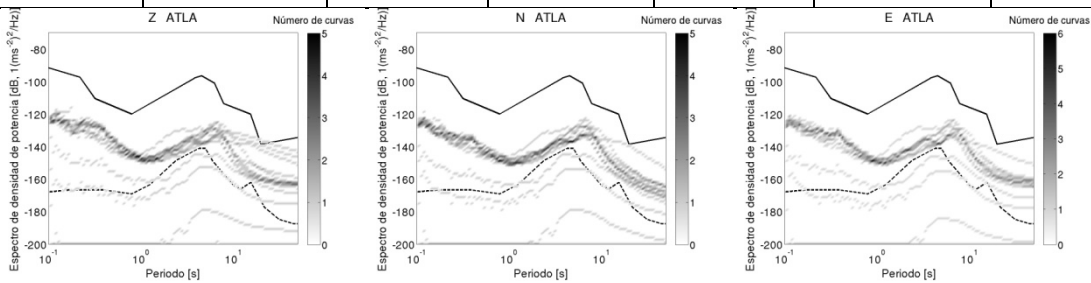
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SJVH	San José Vista Hermosa Mor.	18.6562	-99.2599	1012	Casa junto aeropuerto	Dentro de los límites normales



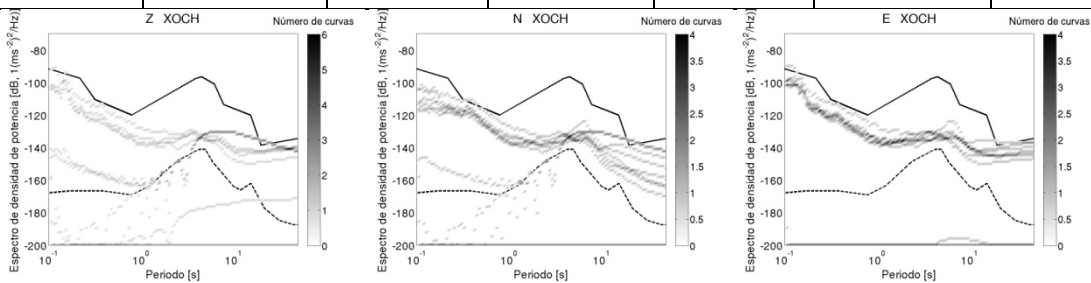
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
APOT	Apotla Mor.	18.7075	-99.246	1065	Casa junto a balneario	Problemas en masas. Alto en periodos largos.



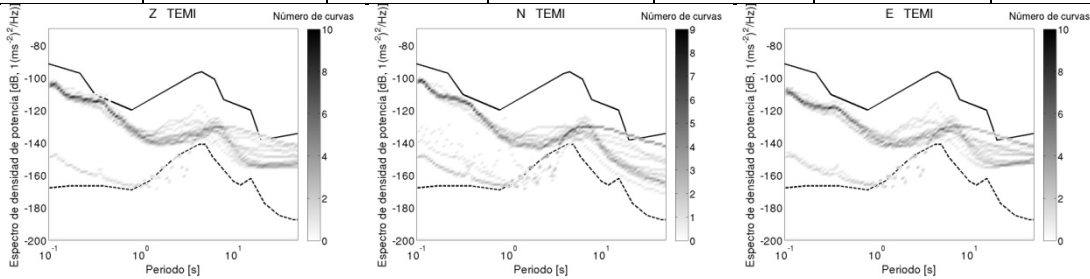
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ATLA	Atlacholoaya Mor.	18.7486	-99.2214	1135	Terreno Comunal	Dentro de los límites normales



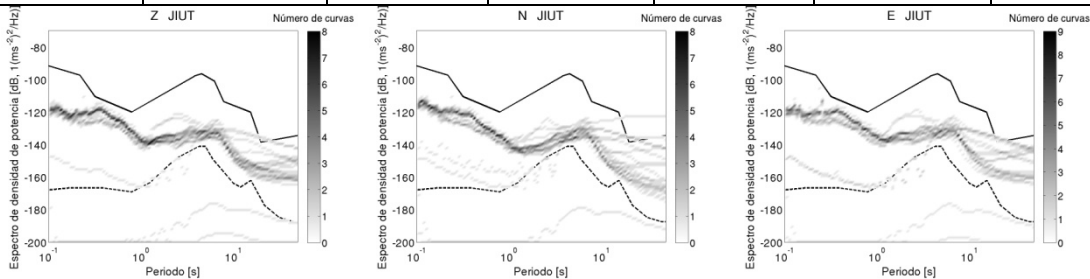
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
XOCH	Xochitepec Mor.	18.7837	-99.2162	1145	Estación de policía	Alto en periodos largos. Problemas con masas.



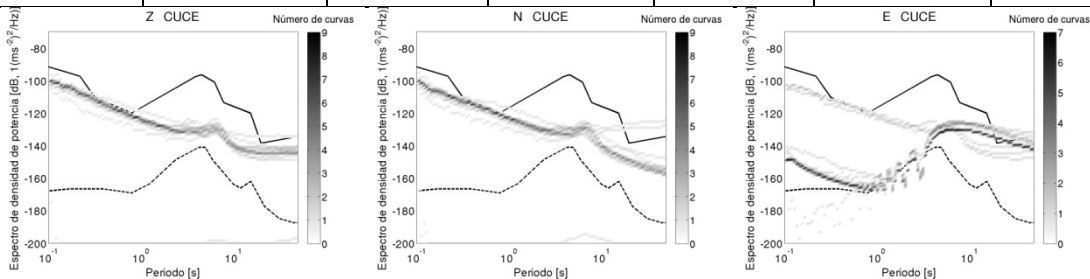
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TEMI	Temixco Mor.	18.8292	-99.2442	1269	Fausto Molina Betancourt	Dentro de los límites normales.



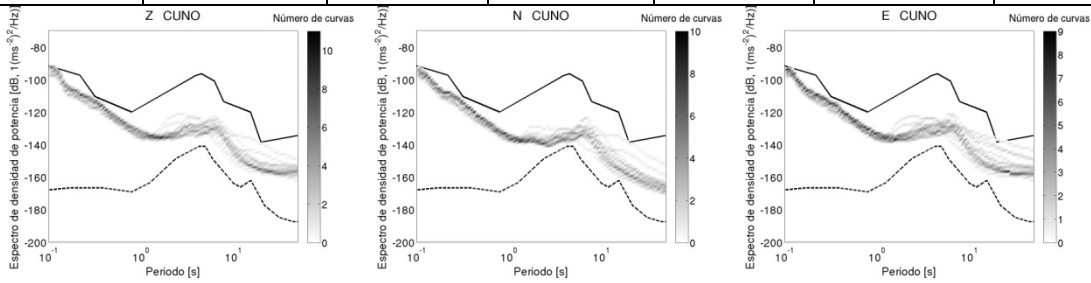
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
JIUT	Jiutepec Mor.	18.8719	-99.1975	1463	Escuela	Dentro de los límites normales



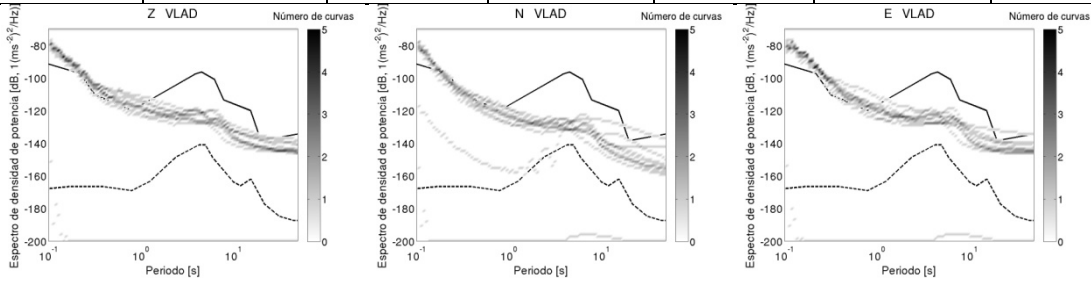
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CUCE	Cuernavaca Centro Mor.	18.9345	-99.2206	1564	ULA	Alto en periodos largos y cortos



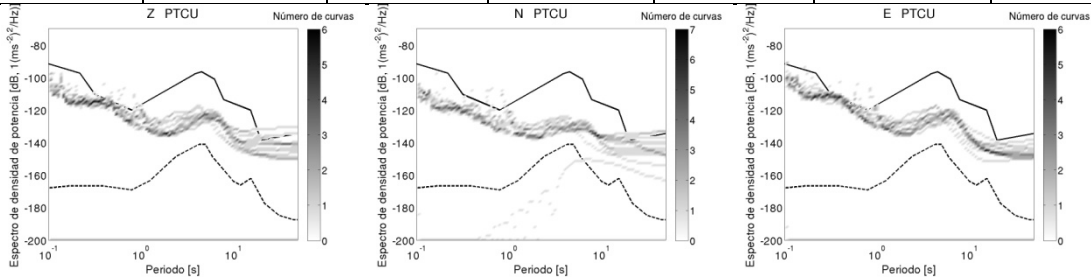
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CUNO	Cuernavaca Norte Mor.	19.0001	-99.2312	1909	Instituto de Matemáticas UNAM	Alto en periodos cortos



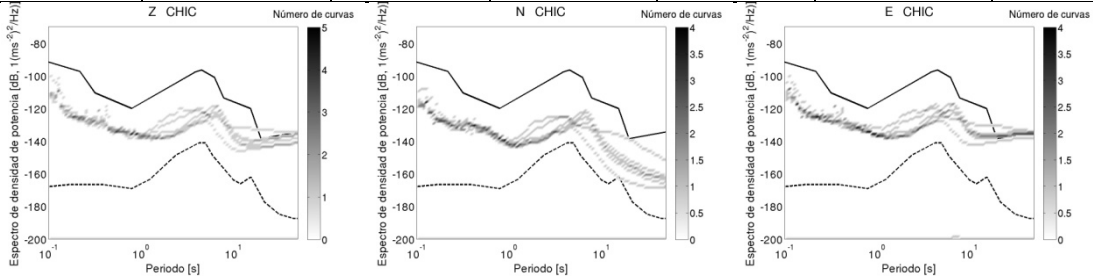
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
VLAD	Huizilac Mor.	19.0317	-99.2702	2580	IEBEM	Alto en periodos largos y periodos cortos.



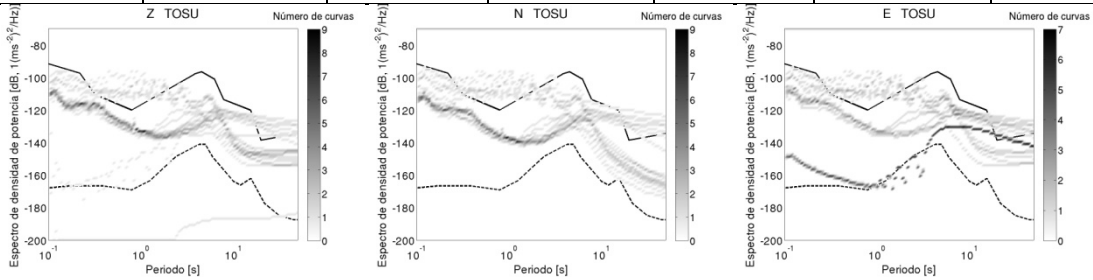
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PTCU	Tres Cumbres Mor.	19.0601	-99.2169	3228	Tv Azteca	Alto en periodos largos.



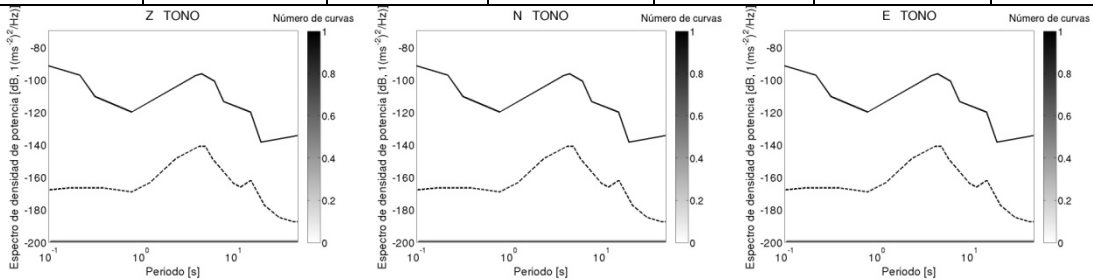
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CHIC	Chichinautzin Mor.	19.0883	-99.1474	3310	Estación VM	Alto en periodos largos.



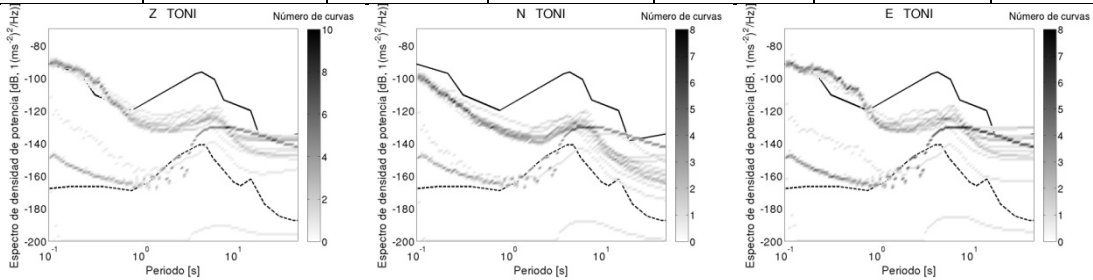
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TOSU	Topilejo Df.	19.1605	-99.1458	2926	Predio particular	Dentro de los límites normales



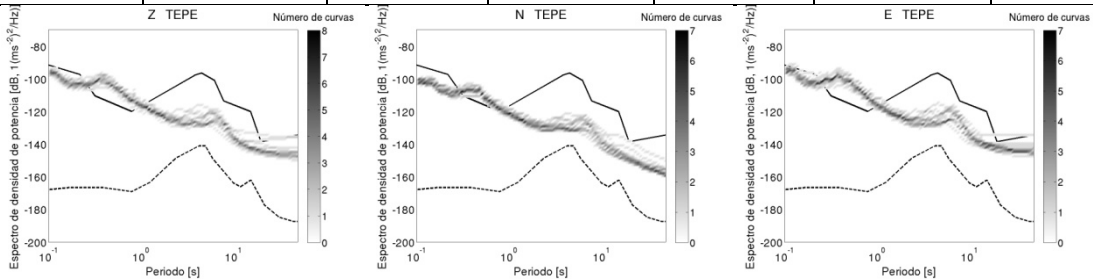
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TONO	Topilejo UNAM Df.	19.2096	-99.153	2779		Problema con las masas del sensor



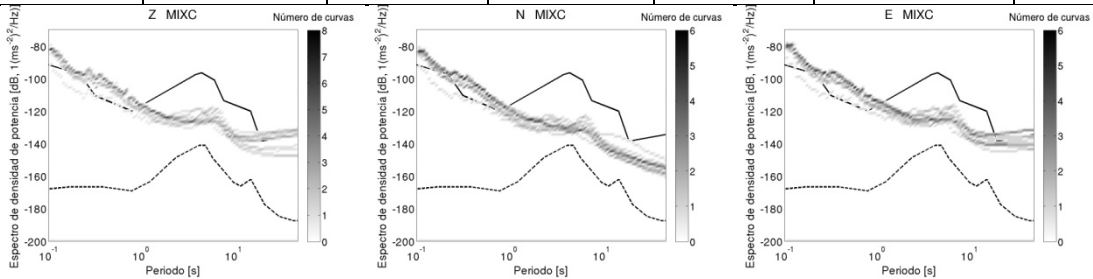
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TONI	Topilejo Nuevo Df.	19.2099	-99.1468	2839	Casa particular.	Alto en periodos largos y periodos cortos



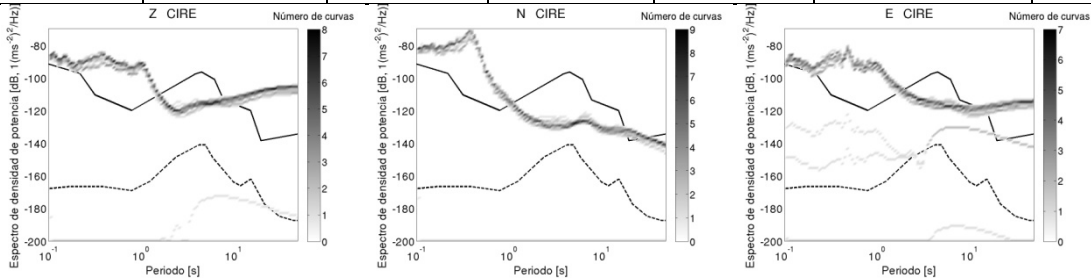
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TEPE	Tepepam Df.	19.2741	-99.1358	2301	Casa particular.	Alto en periodos largos y periodos cortos



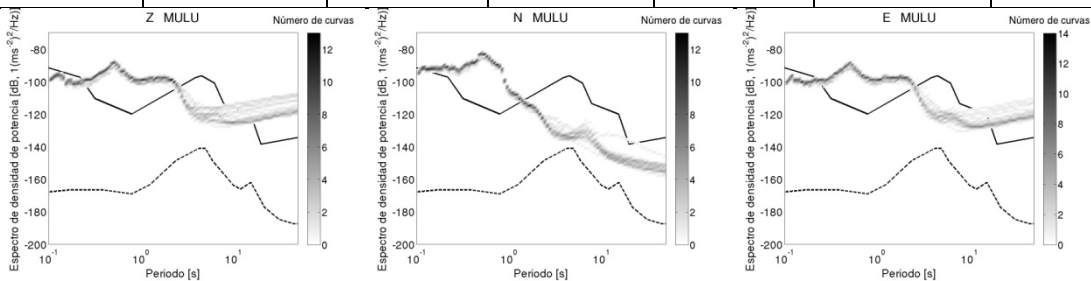
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
MIXC	Mixcoac Df.	19.3775	-99.182	2271	Universidad Panamericana	Alto en periodos largos y periodos cortos



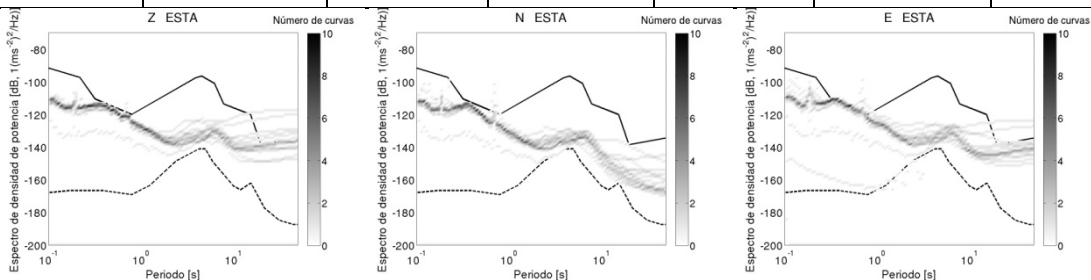
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CIRE	CIRES df.	19.3895	-99.1562	2258	Centro de Instrumentación y Registro Sísmico	Alto en todo el rango de periodos.



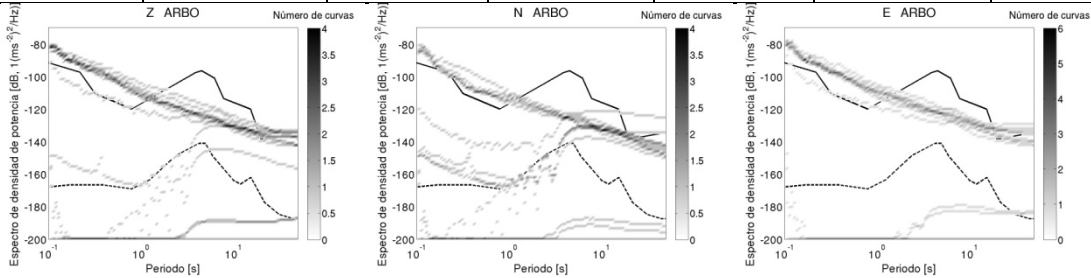
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
MULU	Museo de la Luz Df.	19.4364	-99.1294	2248	Museo de la Luz	Alto en todo el rango de periodos



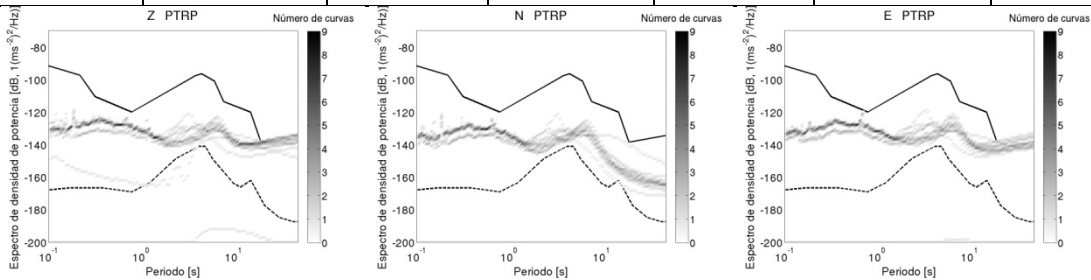
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ESTA	Estazuela Df.	19.4931	-99.1111	2301	Estación del Idel	Alto en periodos largos.



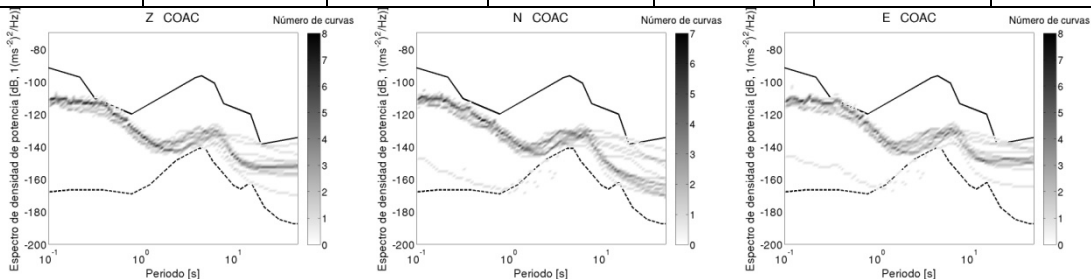
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ARBO	Chiquihuite Ecatepec Xalostoc	19.5344	-99.1417	2268	Escuela	Alto en todo el rango de periodos



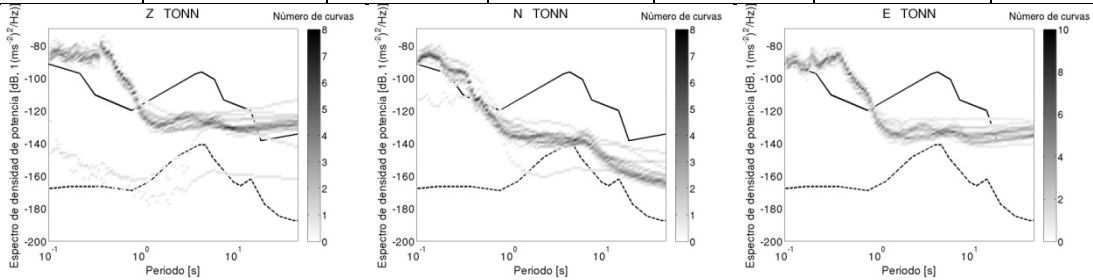
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PTRP	Tres Pedres repetidor Edo. Mex.	19.5913	-99.1125	2917	Puente repetidor	Alto en todo el rango de periodos



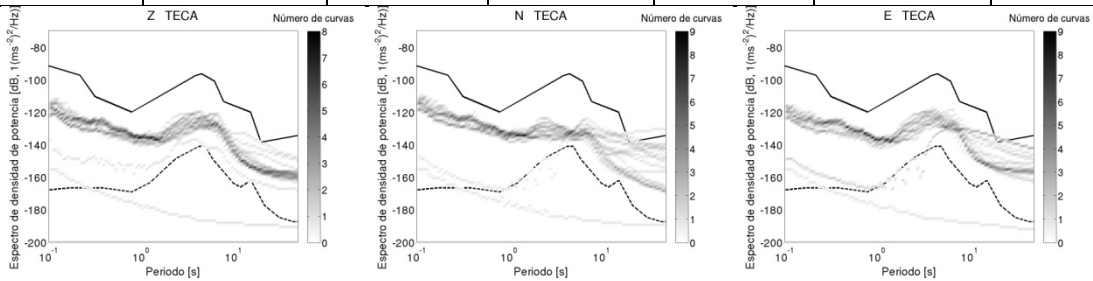
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
COAC	Coacalco Edo. Mex.	19.6104	-99.0718	2341	Escuela	Dentro de los límites normales



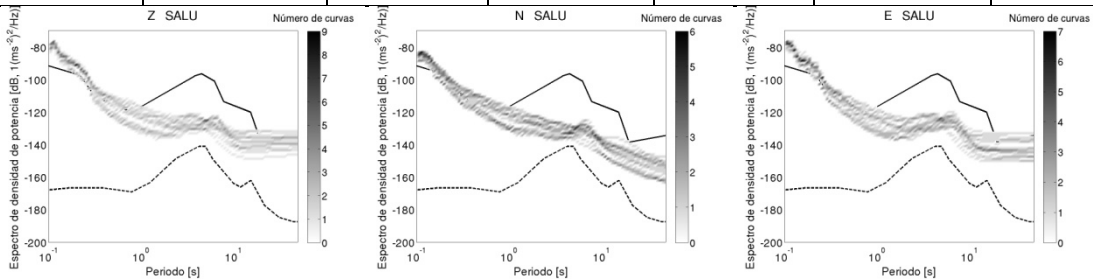
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TONN	Tonanitls Edo. Mex.	19.6864	-99.0463	2262	Escuela Preparatoria 36	Alto en periodos largos y periodos cortos



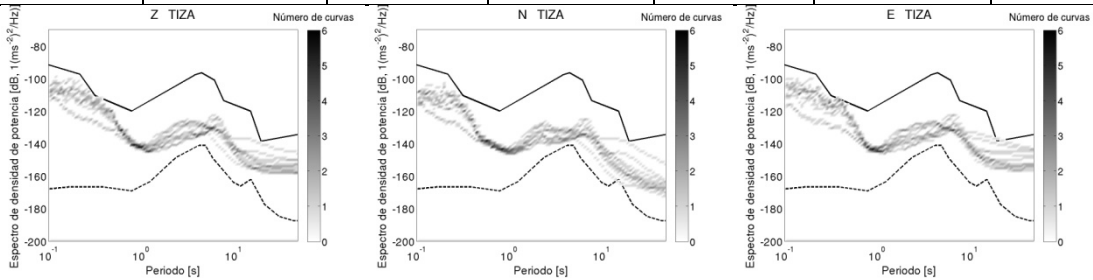
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TECA	Tecamac Edo. Mex.	19.7028	-98.9834	2269	Protección Civil	Dentro de los límites normales



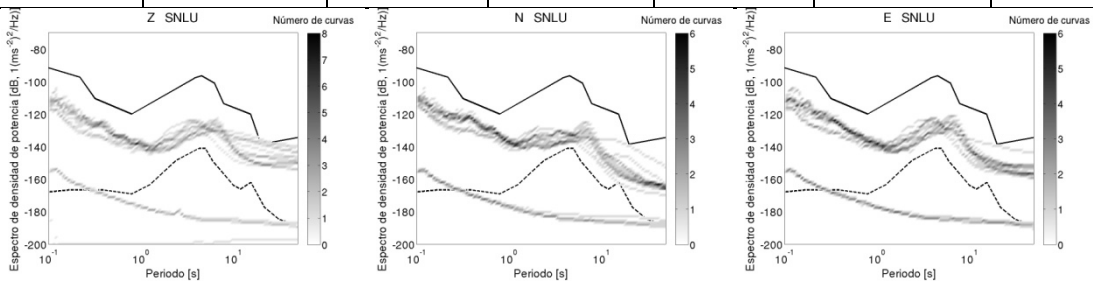
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SALU	Santa Lucia Edo. Mex.	19.7428	-98.9735	2267	Escuela Secundaria Base Aérea	Alto en periodos largos y periodos cortos



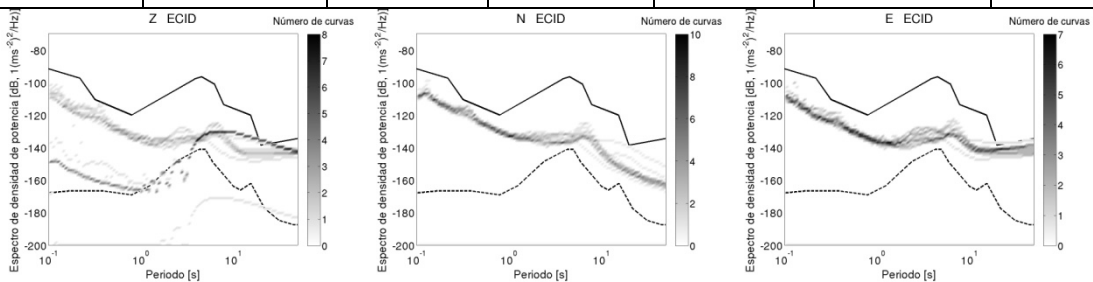
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TIZA	Tizayuca Hgo.	19.8138	-98.9267	2383	Oxford Preparatoria	Dentro de los límites normales



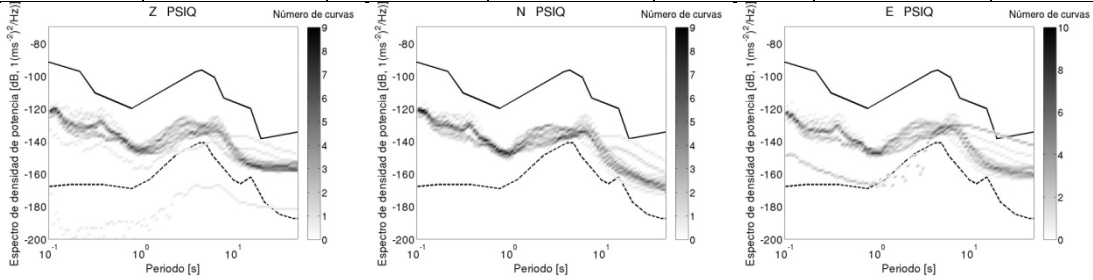
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SNLU	San Lucas Hgo.	19.7848	-98.9805	2288	Escuela Prim. Carlo Pellicer Camaca	Dentro de los límites normales



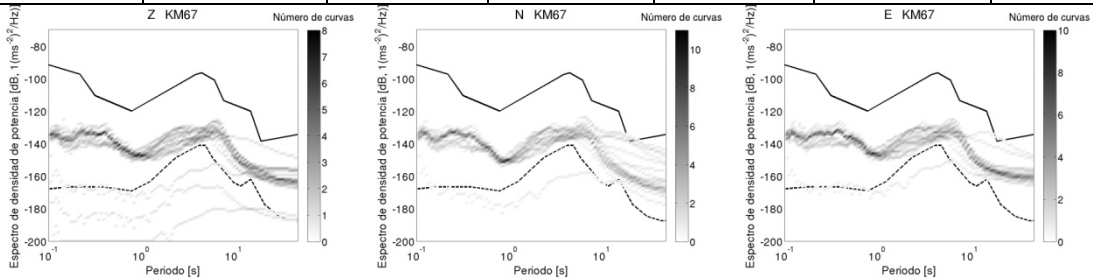
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ECID	El Cid Hgo.	19.8637	-98.9283	2340	Escuela Secundaria 4	Alto en periodos largos.



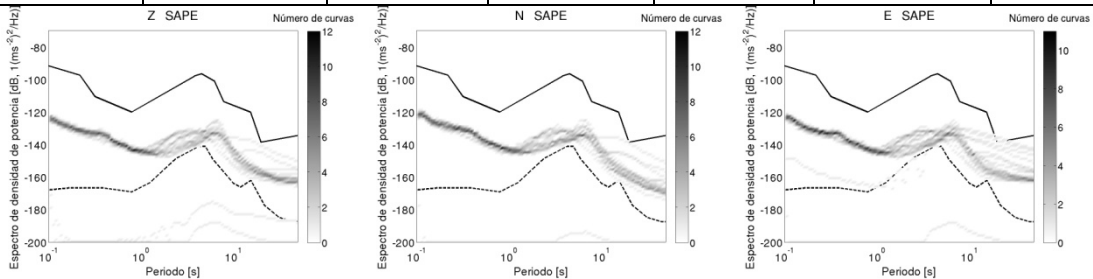
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PSIQ	Psiquiatrica	19.9023	-98.9087	2352	Hospital Psiquiátrico	Dentro de los límites normales



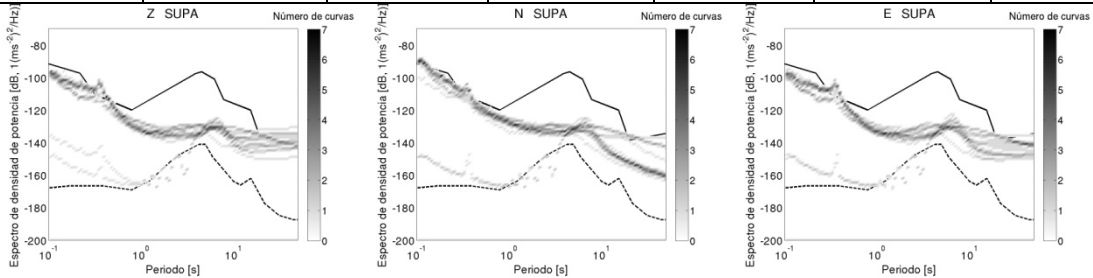
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
KM67	km 67 sobre Autopista Mex-Pachuca Hgo.	19.9569	-98.8806	2423	Tierra pública para basura	Dentro de los límites normales



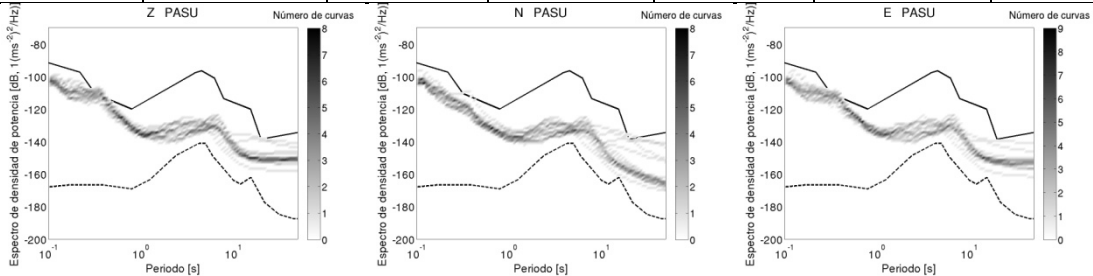
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SAPE	San Pedro Hgo.	19.9893	-98.8637	2403	Casa particular	Dentro de los límites normales



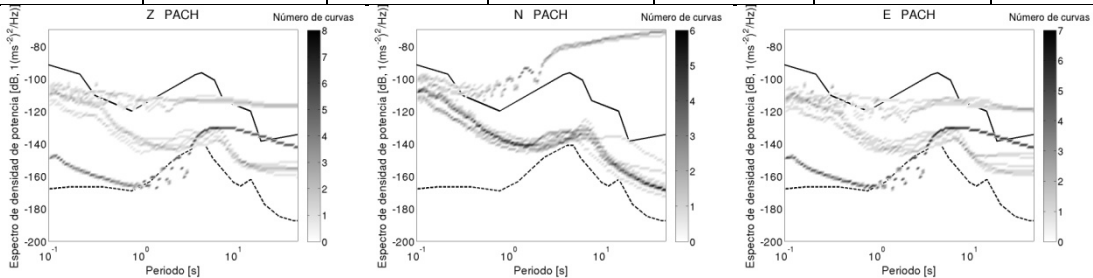
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SUPA	Sur Pachuca Hgo.	20.0339	-98.8068	2404	Primaria: Lázaro Cárdenas	Alto en periodos largos y muy cortos



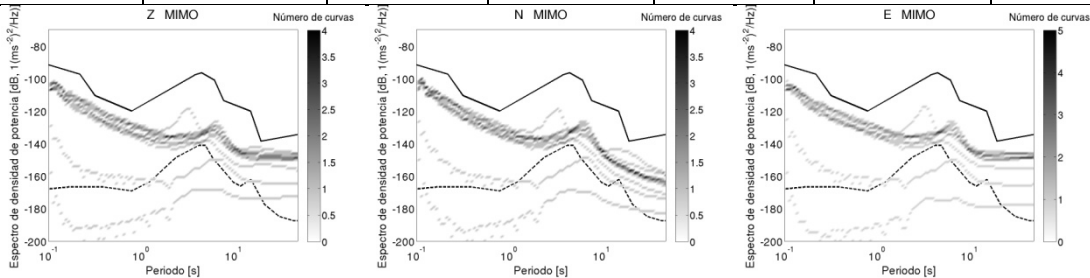
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PASU	Pachuca Sur Hgo.	20.0884	-98.7922	2443	Primaria 27 de Sept.	Alto en periodos cortos



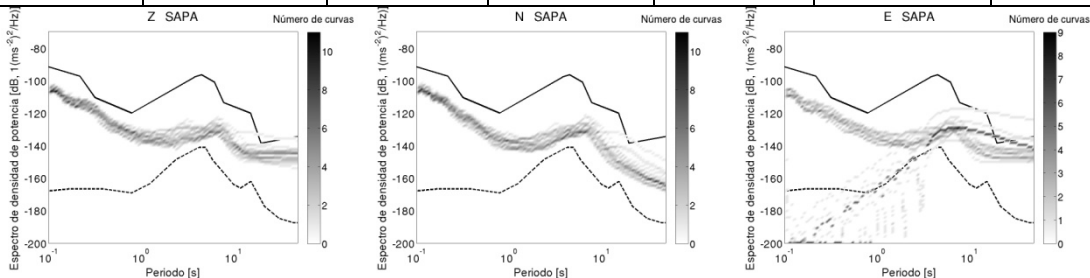
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PACH	Pachuca Hgo.	20.0952	-98.7009	2479	Particular	Problemas con las masas del sensor



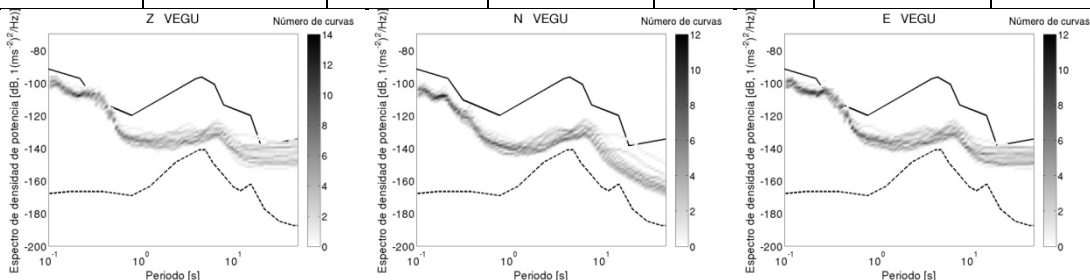
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
MIMO	Mineral del Monte Hgo.	20.1365	-98.684	2854	esc. Ernesto Viveros	Dentro de los límites normales



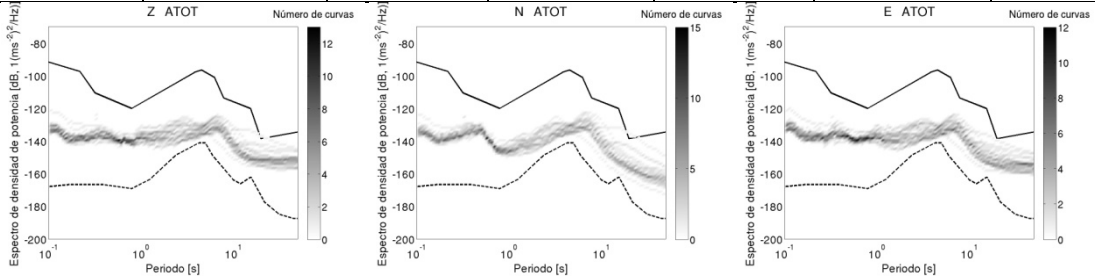
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SAPA	Saan Antonio del Paso Hgo.	20.1508	-98.6154	2558	Esc. Sec. 204	Alto en periodos largos.



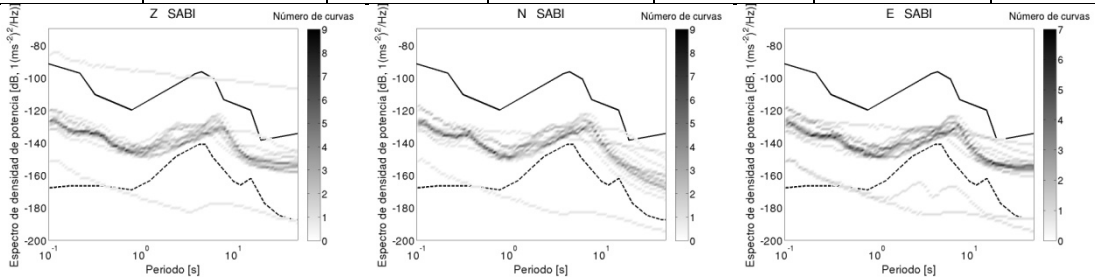
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
VEGU	Venta de Guadalupe Hgo.	20.2183	-98.6422	2292	Jardín de Niños Nuevo Horizonte	Alto en periodos largos y cortos



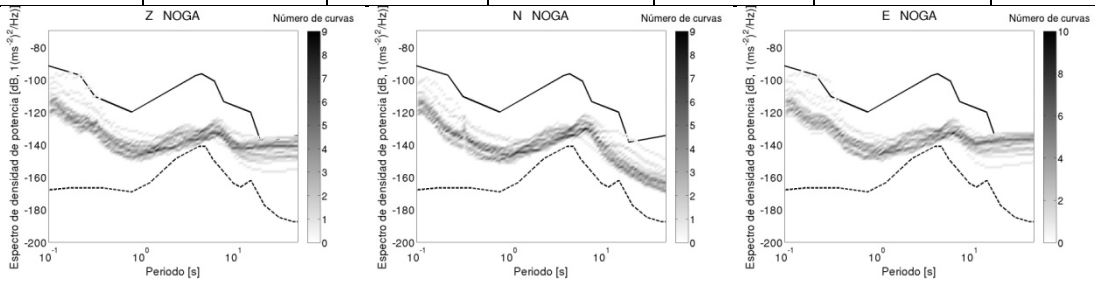
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ATOT	Atotonilco Hgo.	20.2915	-98.7032	2016	Rancho	Dentro de los límites normales



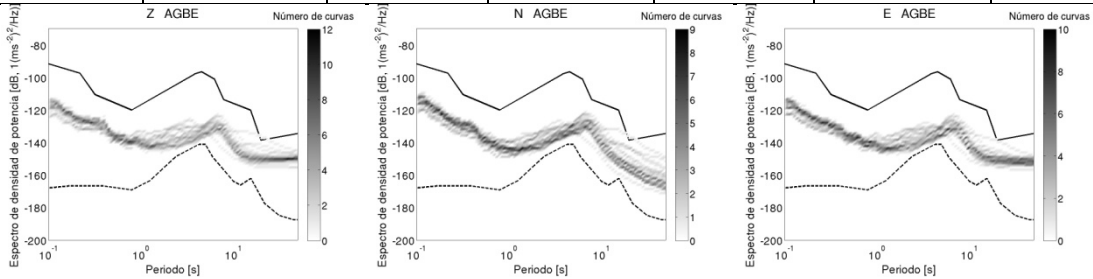
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SABI	Los Sabinos Hgo.	20.3245	-98.6601	1969	Rancho	Dentro de los límites normales



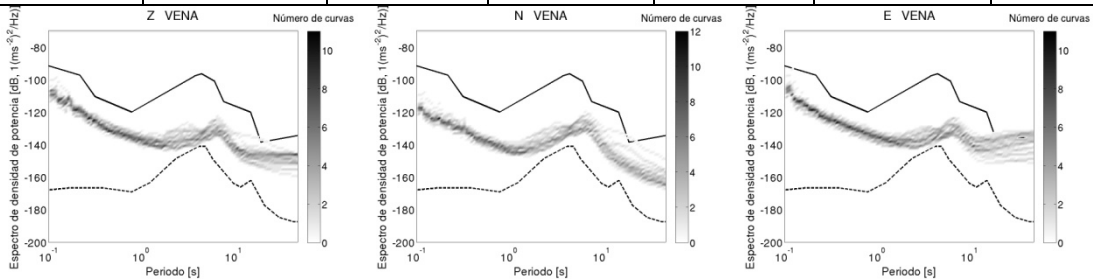
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
NOGA	La Nogalera Hgo.	20.3867	-98.6561	1386	Terreno (antes escuela)	Alto en periodos largos.



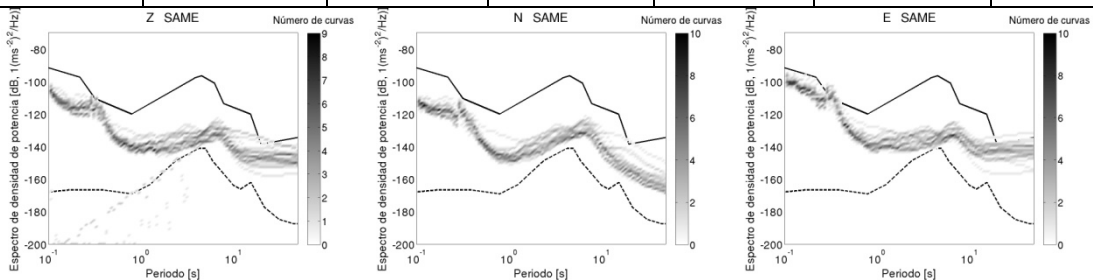
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
AGBE	Agua Bendita Hgo.	20.4302	-98.6308	1801	Terreno Particular	Dentro de los límites normales



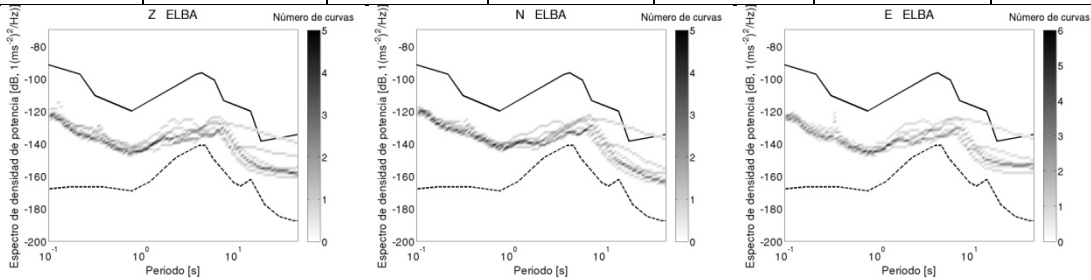
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
VENA	Los Venados Hgo.	20.4734	-98.6698	1303	Rancho	Alto en periodos largos



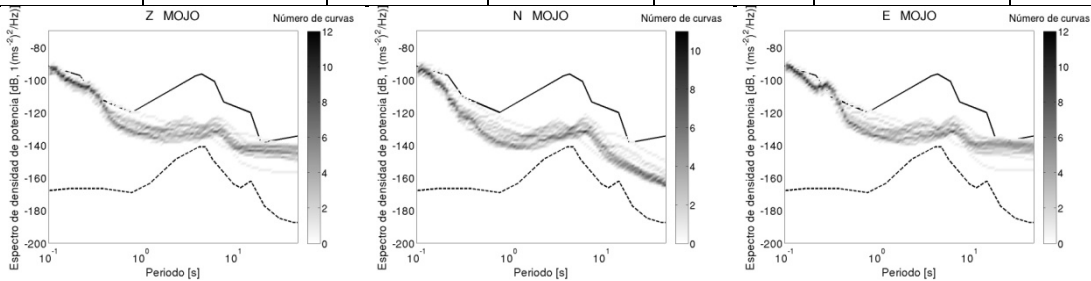
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SAME	San Agustín Mexquititlán Hgo.	20.5326	-98.6432	1268	Sec. Gral. Nicandro Castillo	Alto en periodos largos



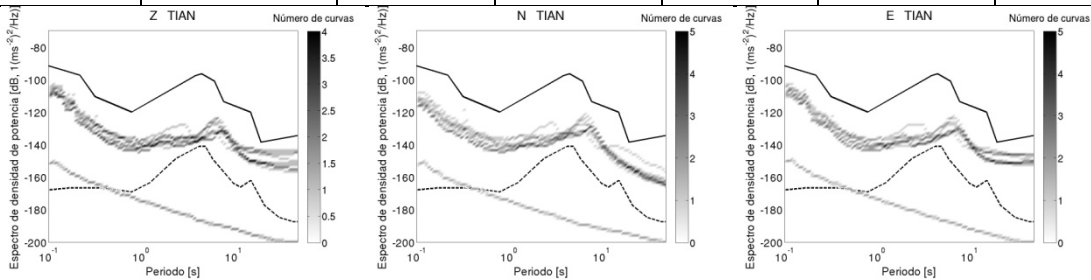
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ELBA	El Banco Hgo.	20.5602	-98.625	1877	Rancho	Dentro de los límites normales



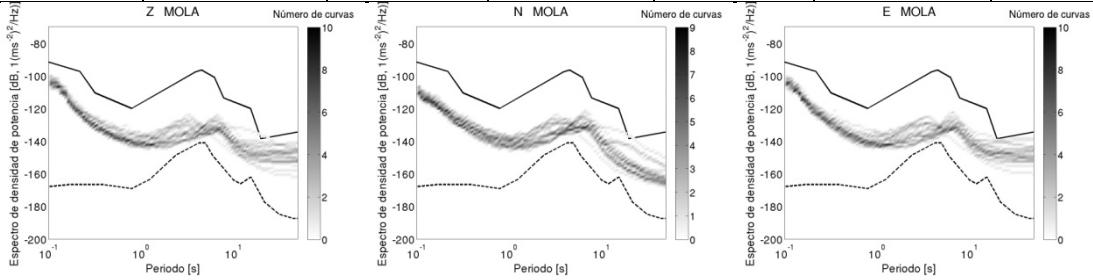
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
MOJO	La Mojenera Hgo.	20.627	-98.6208	2056	Escuela Primaria Emancipación	Alto en periodos largos y cortos



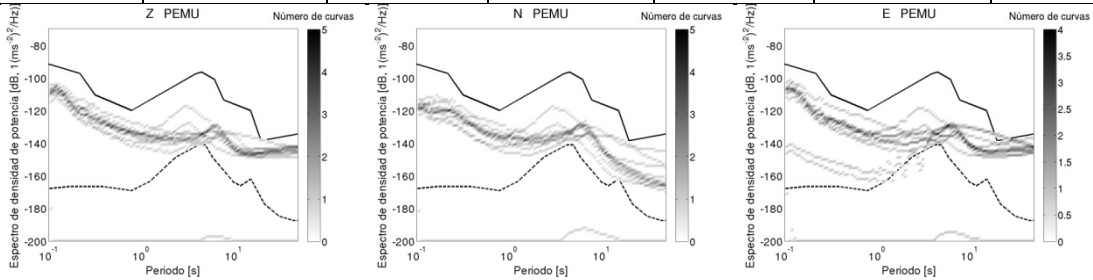
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TIAN	Tianguistengo Hgo.	20.7266	-98.6265	1605	Sec. Federal Gabriel Alarcón 23	Dentro de los límites normales



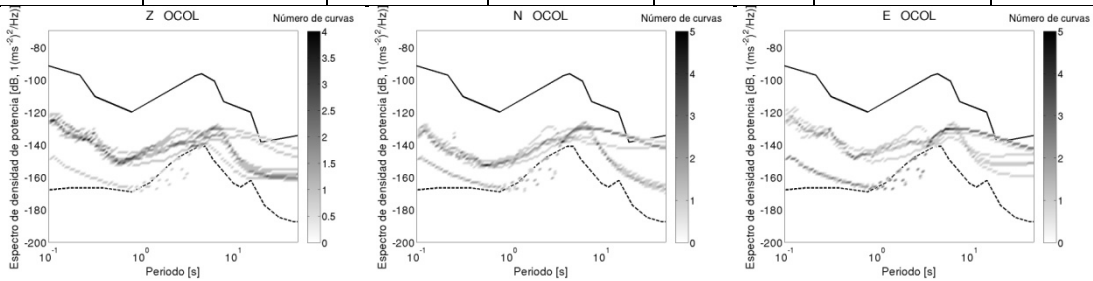
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
MOLA	Molango Hgo.	20.7796	-98.7248	1810	Rancho	Dentro de los límites normales



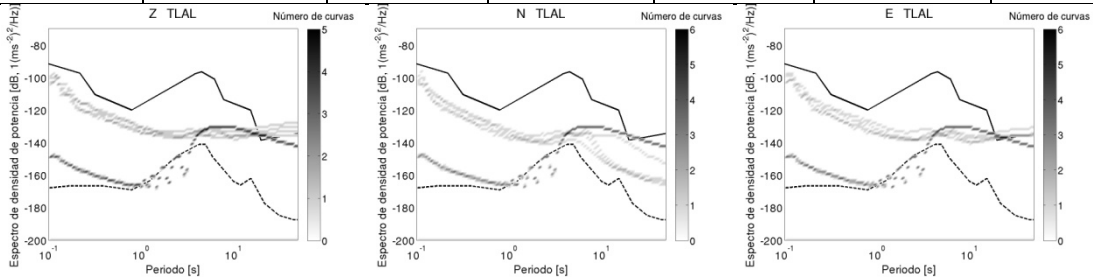
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PEMU	Pemuxtita Hgo.	20.8316	-98.763	1302	Escuela Primaria Jaime Nuno	Dentro de los límites normales



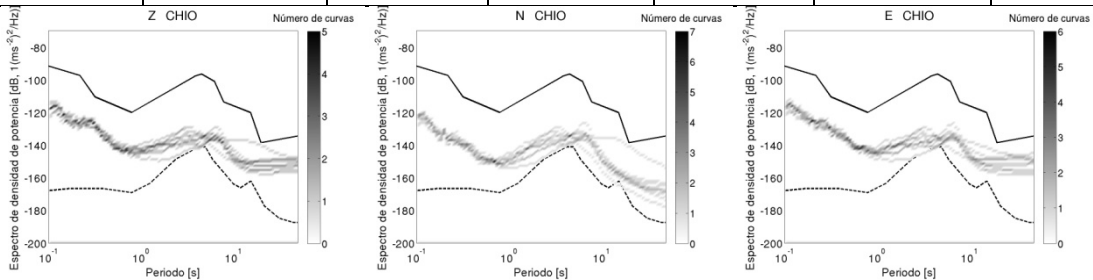
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
OCOL	Ocotlan Hgo.	20.855	-98.7438	0	Terreno	Dentro de los límites normales



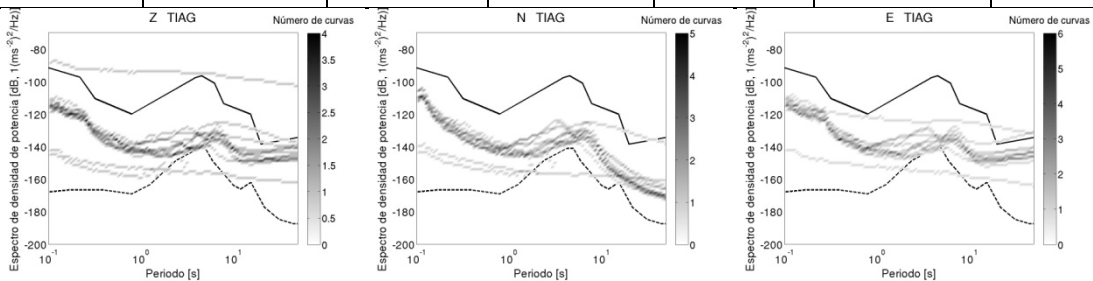
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TLAL	Tlaltepingo Hgo.	20.9334	-98.7297	0	Terreno	Alto en periodos largos.



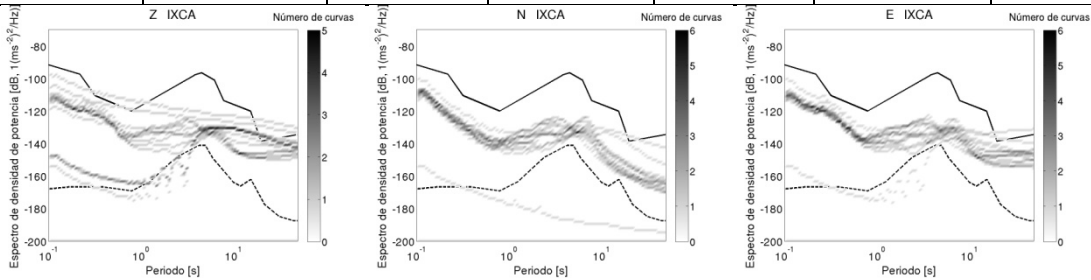
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CHIO	Chinoncucac Hgo.	20.9819	-98.7323	1389	Escuela	Dentro de los límites normales



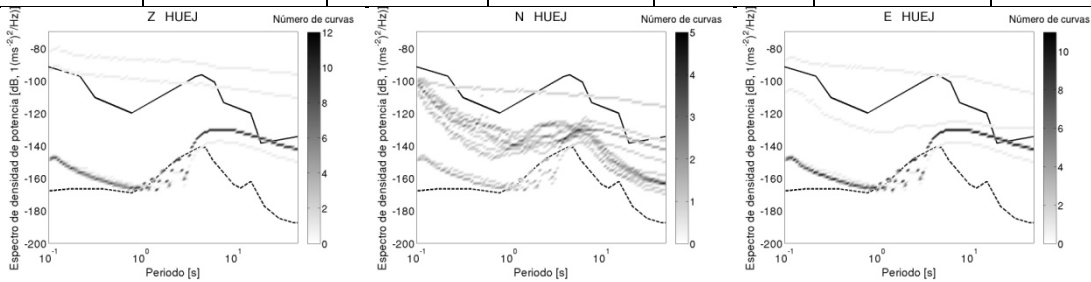
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TIAG	Tianguis Hgo.	21.031	-98.5671	707	Terreno	Alto en periodos largos .



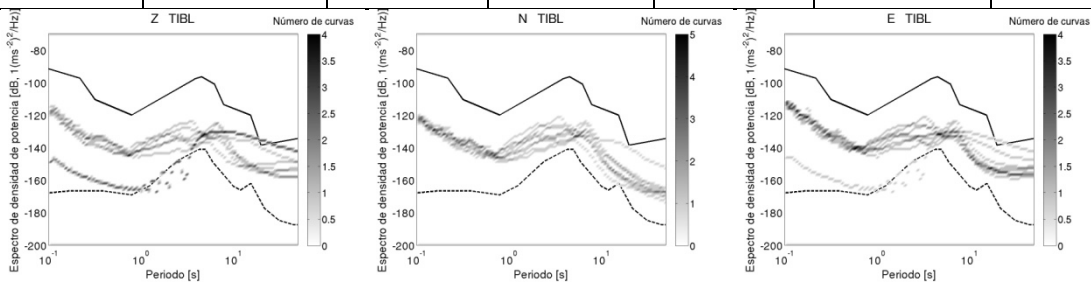
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
IXCA	Ixcatlán Hgo.	21.0789	-98.5306	817	Escuela "Ignacio Zaragoza"	Alto en periodos largos.



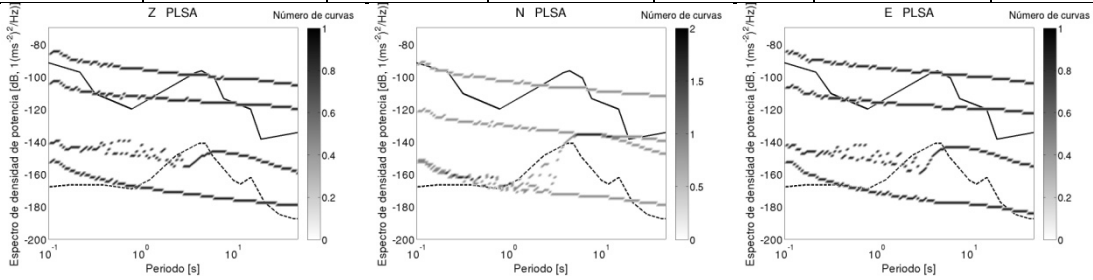
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
HUEJ	Huejutla de Reyes Hgo.	21.1566	-98.3826	134	Universidad de Huejutla	Problema con las masas del sensor



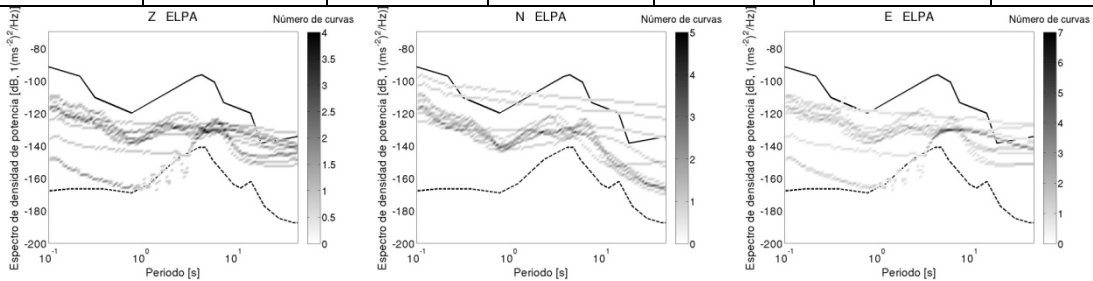
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TIBL	Tierra Blanca Ver.	21.2315	-98.3722	0	Terreno	Dentro de los límites normales



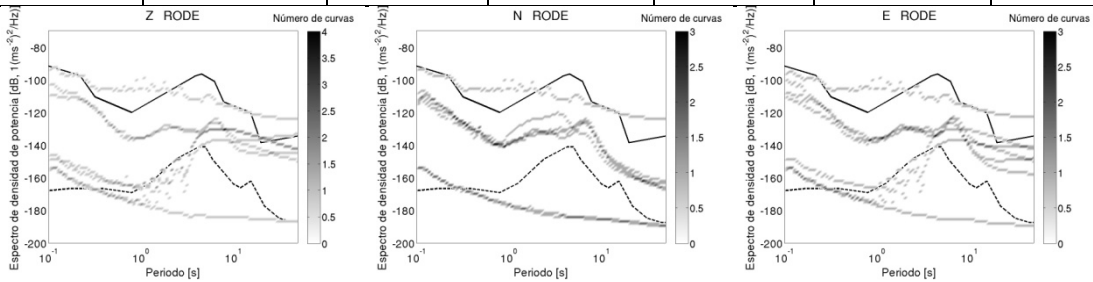
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
PLSA	Platon Sanches Ver.	21.2749	-98.3585	74	Colegio cecytev	Problema con las masas del sensor



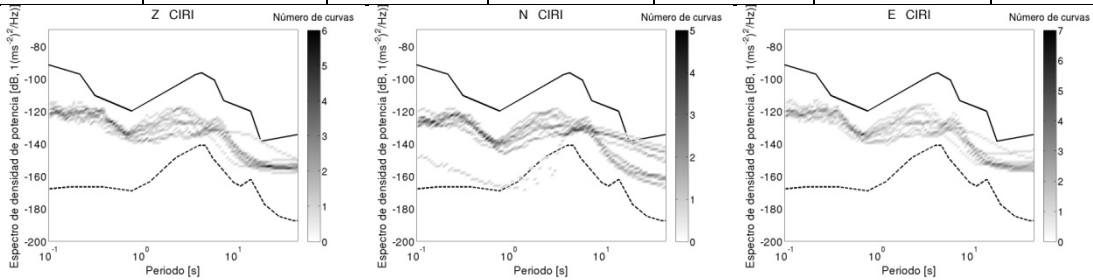
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
ELPA	El Palmar Ver.	21.3329	-98.3463	115	Terreno	Alto en periodos largos .



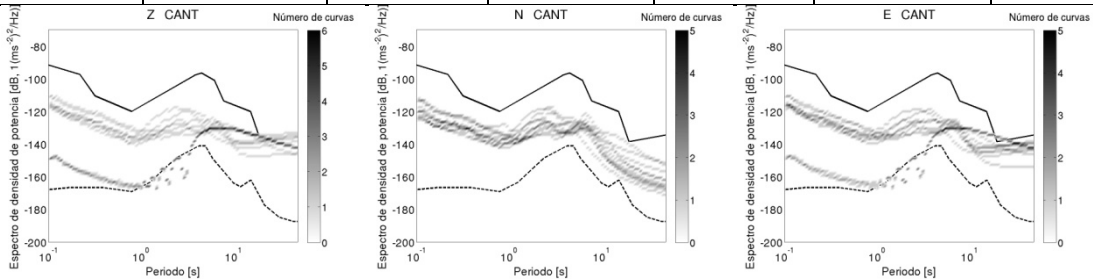
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
RODE	El Rodeo Ver.	21.3444	-98.3658	145	Rancho	Problemas con las masas del sensor



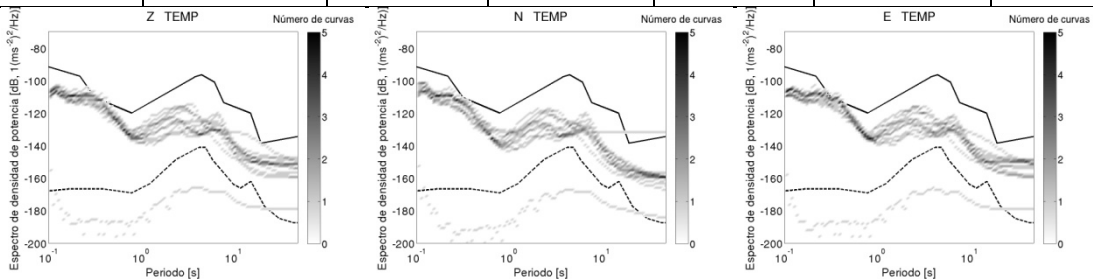
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CIRI	Cirio Ver.	21.4036	-98.3597	143	Rancho	Dentro de los límites normales



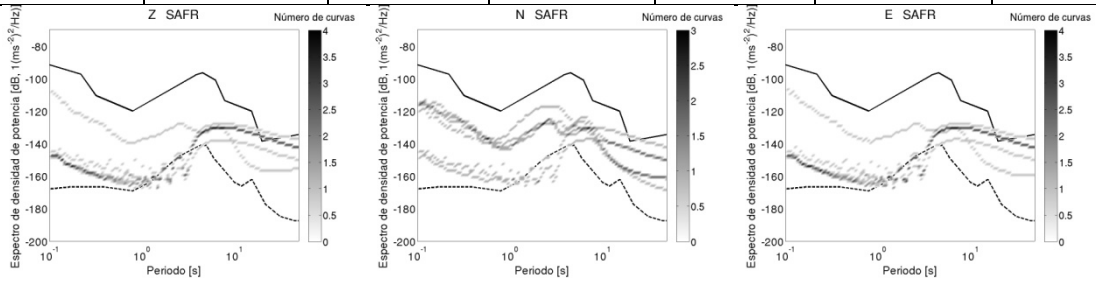
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
CANT	El Cantarito Ver.	21.4683	-98.3573	182	Escuela Jesús Terán	Alto en periodos largos.



CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
TEMP	Tempoal Ver.	21.4929	-98.3893	136	Escuela	Alto en periodos cortos

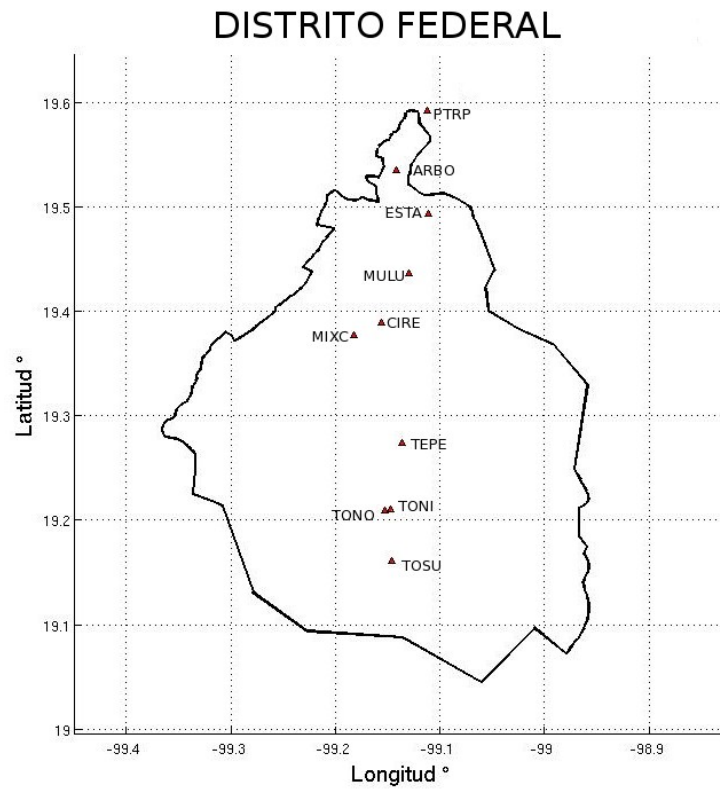


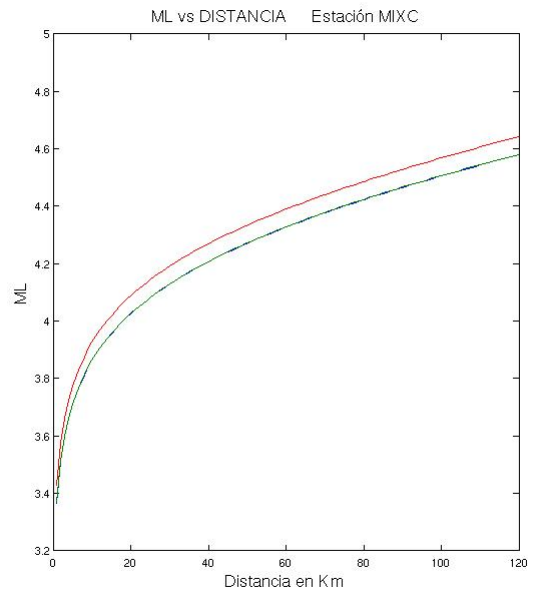
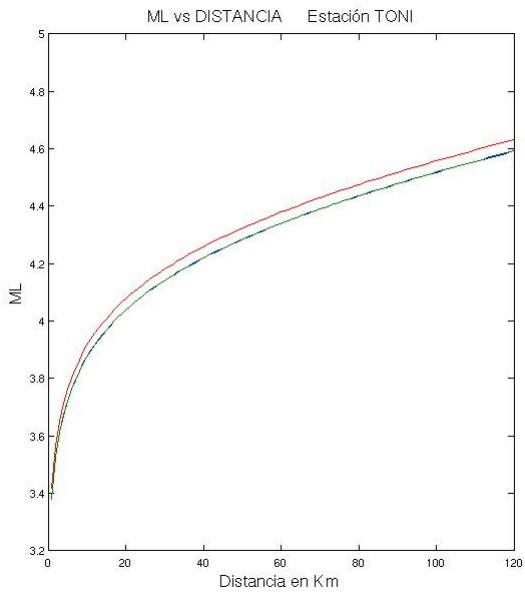
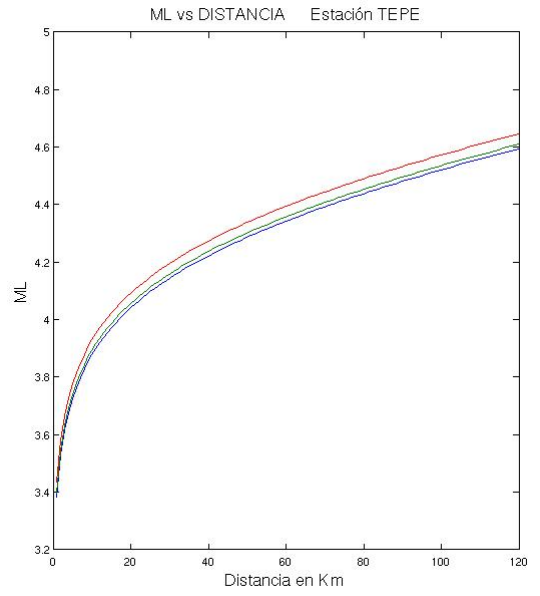
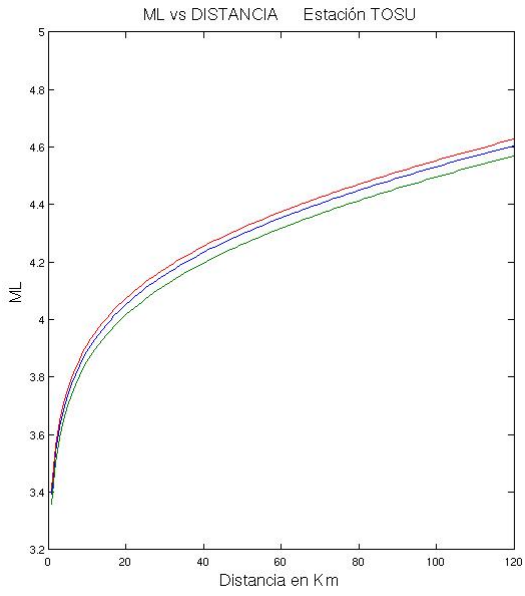
CÓDIGO	POBLACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	UBICACIÓN	NIVEL DE RUIDO
SAFR	San Francisco Ver.	21.545	-98.3789	113	Rancho	Problema con las masas del sensor

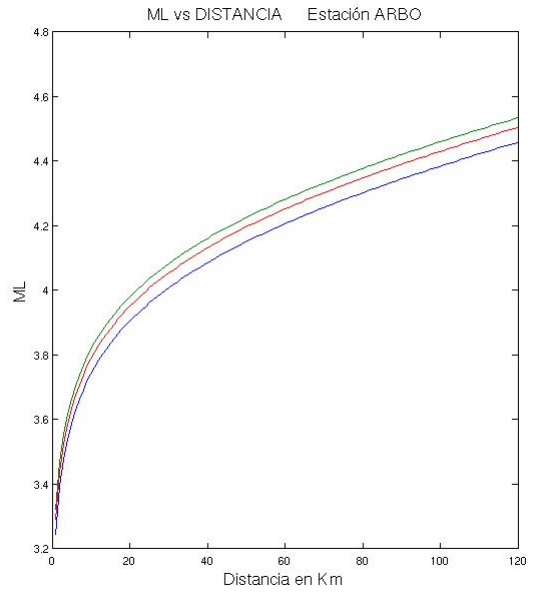
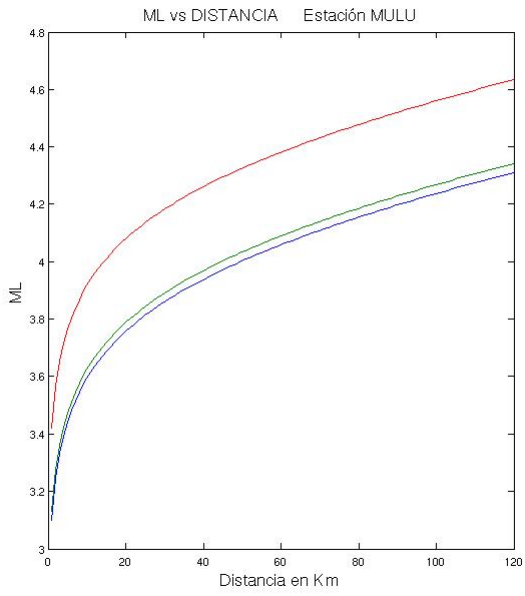
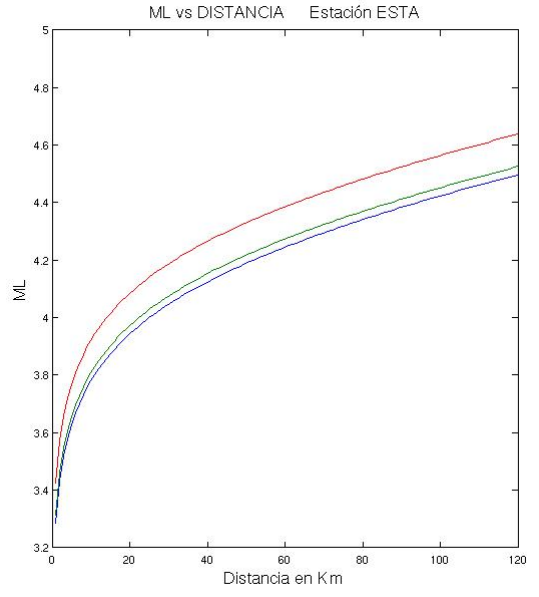
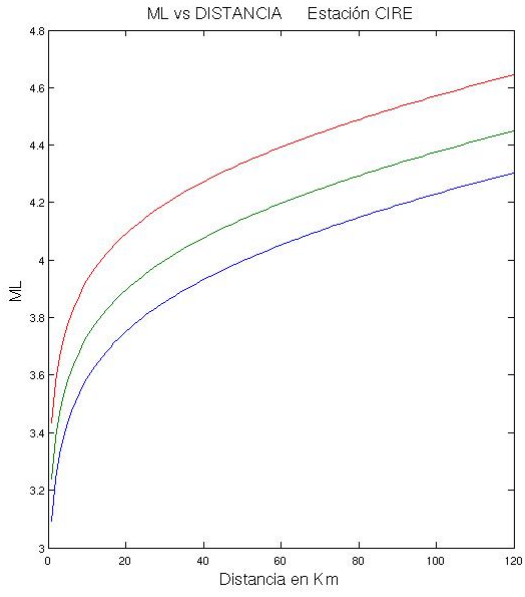


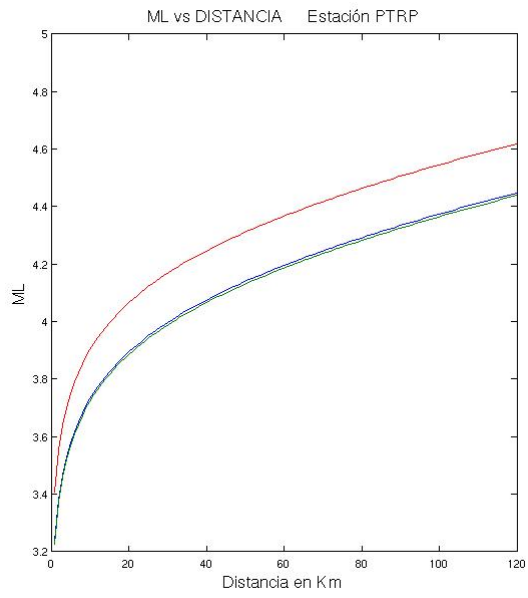
APÉNDICE 2. Curvas de magnitud mínima.

Curvas de magnitud mínima local para las estaciones de la línea MASE que se instalaron dentro de la Ciudad de México y área metropolitana.









APÉNDICE 3. Corrección por instrumento.

Las señales registradas por un sismógrafo ya sean analógicas o digitales rara vez mostraran el movimiento real del suelo.

Al proceso de recuperar de cualquier registro sísmico el desplazamiento real del suelo se le llama corregir por instrumento.

Un sismograma puede ser tratado como el resultado de una secuencia de 3 filtros lineales básicos.

$$u(t) = s(t) * g(t) * i(t) \quad (\text{A3.1})$$

donde $u(t)$ es el sismograma, $s(t)$ es la señal proveniente de la fuente sísmica, $g(t)$ es efecto del medio por donde pasa la onda e $i(t)$ es la respuesta del instrumento.

En sismología se supone que nuestro instrumento se comporta como un sistema lineal. Los instrumentos pueden ser sensores, amplificadores o sistemas completos de registro. La linealidad significa que existe una relación lineal entre la señal de entrada y la señal de salida. Si la señal de entrada es $x(t)$ y la salida $y(t)$, luego de multiplicar $x(t)$ por una constante, dará lugar a una señal de salida multiplicado por la misma constante.

Para este trabajo se calculó la respuesta del sensor Guralp CMG-3T por medio de su archivo de polos y ceros. La función de transferencia está dada por:

$$T(\omega) = c \frac{(i\omega - Z_1)(i\omega - Z_2)(i\omega - Z_3) \dots (i\omega - Z_m)}{(i\omega - P_1)(i\omega - P_2)(i\omega - P_3) \dots (i\omega - P_n)}, \quad (\text{A3.2})$$

donde c es la constante de normalización, Z_i son los ceros y P_j los polos que sirven para calcular la función de respuesta $T(\omega)$ para después obtener las amplitudes

$$A = |T(\omega)|. \quad (\text{A3.3})$$

Los valores de polos y ceros utilizados fueron los siguientes:

ZEROS 2

0.0 0.0

0.0 0.0

POLES 5

-5.89e-3 5.89e-3

-5.89e-3 -5.89e-3

-180.00.0

-160.00.0

-80.0 0.0

CONSTANT 2.1749528e15

La Figura A3.1 muestra la respuesta del sismómetro Guralp CMG-3T en el dominio de la frecuencia.

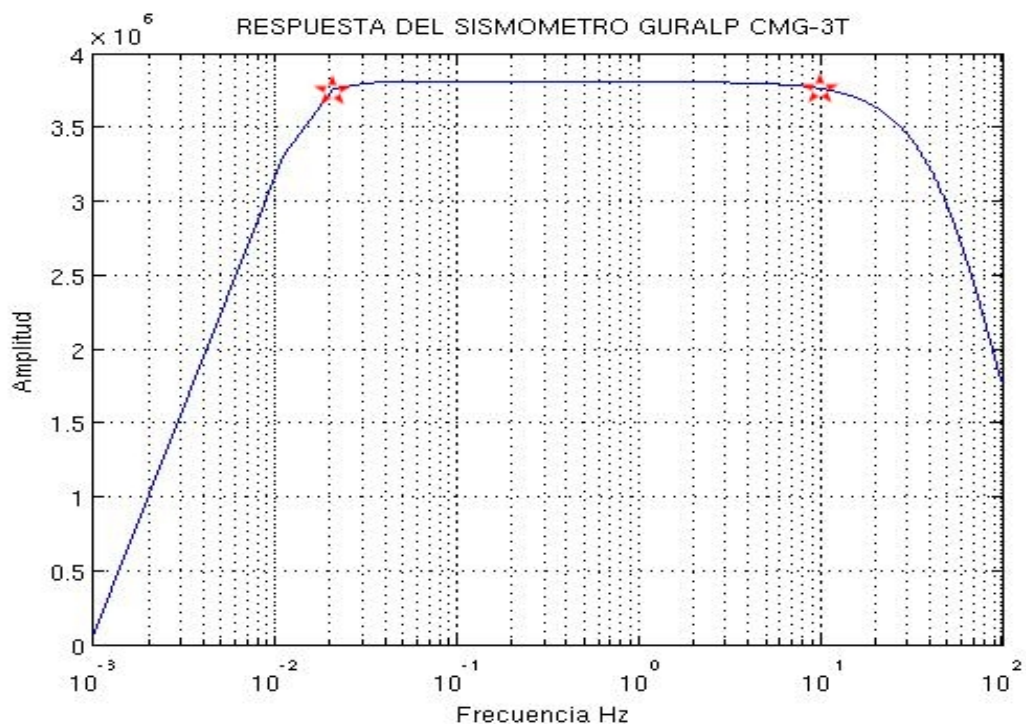


Figura A3.1. Respuesta del sismómetro Guralp CMG.3T.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA
FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ CARACTERIZACIÓN DE NIVELES DE RUIDO
EN ESTACIONES SIMOLÓGICAS DEL
PROYECTO MASE”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

JORGE ARTURO REAL PÉREZ



DIRECTOR DE TESIS:

DRA. XYOLI PÉREZ COMPOS

CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F., NOVIEMBRE 2010