

## **CAPÍTULO 3. ANALISIS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR.**

### **3.1 Elección de los datos**

Los datos de este trabajo fueron obtenidos de la Red de Monitoreo Sísmico del Volcán Popocatepetl de banda ancha. Se utilizaron las estaciones de Chiquipixtle (PPXB) y Canario (PPPB), las cuales fueron instaladas en julio y marzo de 1998 respectivamente. Ambas estaciones cuentan con un sismómetro triaxial de banda ancha de marca Guralp Cmg-40T con una respuesta plana de 0.03 a 50 Hz. Los sismómetros de banda ancha permiten obtener datos en una banda de frecuencias más grande que los de periodo corto, y debido a su mayor rango dinámico no hay saturación de los datos, en el caso de una gran actividad sísmica. Estas estaciones están localizadas a una altura de 3980 y 4170 m., respectivamente y ambas estaciones están sobre el cono volcánico.

Los datos registrados por las estaciones son enviados teleméricamente y en forma continua al centro de registro del CENAPRED. Las señales son digitalizadas a razón de 100 muestras por segundo para cada canal y hasta 1999 se utilizó el sistema automático XDETECT, a partir del año 2000 a la fecha el sistema de registro utilizado es EARTHWORM, con este programa los datos son almacenados en formato dmx, con una duración de 10 minutos.

Para tener un resultado más confiable y estable del comportamiento, la amplitud y las frecuencias características del tremor generado por el volcán Popocatepetl, en este análisis se tomaría en cuenta un evento significativo de tremor por semana durante los años de 1999, 2000, 2001, 2002 y 2003. Sin embargo esto no se pudo llevar a cabo al 100%, debido a que los datos almacenados se han perdido o porque el volcán no registró actividad alguna dentro del periodo de análisis.

CAPITULO 3. ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR

En la Tabla 3.1 se hace un resumen de los días en que se registraron eventos de tremor y que fueron incluidos en este análisis, así mismo se incluye la duración de los mismos.

**Tabla 3.1. Días en que se registraron eventos de tremor y su duración. (Datos tomados de los sismogramas en papel de periodo corto, generados en el CENAPRED).**

Fecha	Duración [min]	Fecha	Duración [min]	Fecha	Duración [min]
01/01/1999	30	03/05/2001	180	06/09/2002	1140
21/01/1999	30	05/05/2001	120	12/09/2002	600
30/01/1999	180	10/05/2001	120	13/09/2002	720
04/02/1999	120	13/05/2001	420	14/09/2002	840
01/03/1999	600	15/05/2001	660	17/09/2002	420
03/03/1999	60	18/05/2001	360	26/09/2002	240
05/03/1999	180	01/06/2001	300	07/10/2002	180
06/03/1999	180	05/06/2001	150	18/10/2002	60
11/03/1999	30	10/06/2001	600	22/10/2002	120
11/11/1999	120	15/06/2001	300	23/10/2002	300
14/11/1999	180	19/06/2001	240	02/11/2002	360
16/10/2000	150	24/06/2001	540	07/11/2002	210
13/12/2000	60	26/06/2001	720	10/11/2002	240
15/12/2000	480	18/11/2001	50	02/12/2002	240
16/12/2000	300	20/12/2001	660	09/12/2002	360
23/01/2001	90	23/01/2002	420	10/12/2002	180
21/02/2001	30	15/02/2002	90	31/12/2002	180
27/02/2001	90	16/02/2002	150	16/01/2003	90
28/02/2001	150	09/03/2002	210	22/01/2003	180
01/03/2001	350	23/03/2002	140	01/02/2003	60
11/03/2001	150	28/03/2002	150	02/04/2003	120
12/03/2001	30	23/05/2002	60	03/04/2003	60
13/03/2001	30	29/06/2002	300	16/04/2003	120
14/03/2001	120	14/07/2002	180	17/04/2003	240
15/03/2001	60	16/07/2002	420	18/04/2003	60
24/03/2001	120	18/07/2002	360	22/04/2003	300
01/04/2001	420	31/07/2002	120	28/04/2003	780
02/04/2001	720	01/08/2002	180	30/04/2003	180
06/04/2001	300	03/08/2002	480	03/05/2003	300
08/04/2001	300	04/08/2002	600	07/05/2003	540
22/04/2001	120	05/08/2002	360	10/05/2003	720
26/04/2001	240	06/08/2002	480	27/05/2003	360
29/04/2001	240	09/08/2002	600	29/05/2003	360
30/04/2001	180	10/08/2002	1080	08/06/2003	420

### 3.2 Procesado

Para el análisis, los datos se procesaron con el programa SEISMO\_VOLCANALYSIS: Signal analysis tools for seísmo-volcanic events, desarrollado por Philippe Lesage. El programa es escrito usando Matlab 7.0, junto con sus interfaces de usuario gráficas y las herramientas del procesado de señales. El análisis de tiempo-frecuencia hace uso de las herramientas de tiempo frecuencia desarrollado por François Auger, Olivier Lemoine, Paulo Gonçalves y Patrick Flandrin bajo los derechos del Centro Nacional de Investigación Científica de Francia ( CNRS, Centre National de la Recherche Scientifique of France) y en colaboración con el Instituto de Geofísica de la UNAM.

El software incluye 6 interfaces, con sus archivos correspondientes de fuente (\*.m) y figura (\*.fig). Para este trabajo solo se utilizaron dos interfaces, Seismo\_volcanalysis1 y Seismo\_volcanalysis2, las cuales son brevemente descritas:

La primera interface Seismo\_volcanalysis1 puede ser considerada como el programa principal, este permite leer los archivos, seleccionar secciones de los registros y llamar a las herramientas de análisis de señales. Los formatos de los archivos que puede leer son: SAC, SUDS (\*.DMX), SEISAN, GCF (Guralp Compressed format), Datos binarios y WAV (PC archivos de audio). Una vez leído el archivo se le puede aplicar un filtro pasabandas Butterworth, indicando la frecuencia del ancho de banda; también se le puede aumentar el tamaño o un acercamiento a alguna parte específica de la señal.

La segunda interface Seismo\_volcanalysis2 lleva a cabo estimaciones espectrales y representaciones tiempo frecuencia.

Los métodos espectrales disponibles son:

- Espectro de amplitud basado en la clásica transformada de Fourier
- Espectro de Fourier suavizado
- Períodograma promediado (espectro de amplitud)

- Densidad de poder espectral usando el método de Burg
- Densidad de poder espectral usando el método (AR) de Yule-Walker

Para la representación de tiempo-frecuencia, están disponibles los siguientes métodos:

- Transformada de Fourier de tiempo corto
- Método de Burg
- Método (AR) de Yule-Walker
- Escalograma (ondícula de Morlet)
- Espectrograma reasignado
- Distribución Wigner-Ville
- Pseudo Wigner-Ville
- Pseudo suavizado Wigner-Ville
- Distribución Choi-Williams
- Distribución de Interferencia Reducida
- Frecuencia instantánea
- Crestas

En ésta interface en el análisis espectral tiene una opción donde se pueden seleccionar los picos espectrales del espectro calculado.

Para cada evento de tremor se seleccionó una ventana que varía de 60 a 120 segundos cada 10, 20 o 30 minutos dependiendo la duración de cada episodio. A cada segmento seleccionado de la señal se le calculo su espectro y su espectrograma. El espectrograma se calculó usando el método de Burg, que consiste en un modelo auto-regresivo (AR) aplicado a la señal, el cual minimiza los errores de predicción por el método de mínimos cuadrados, al mismo tiempo que restringe los parámetros AR para satisfacer la recursión de Levinson- Durbin. La ventaja que ofrece este método es la de producir un modelo más estable, así como generar un espectrograma de alta resolución.

La importancia del análisis espectral, consiste en analizar su comportamiento en el dominio de la frecuencia, debido a que la energía de la fuente en la señal se manifiesta como la frecuencia dominante en el espectro de Fourier (Etter, 1997), con este análisis podemos obtener la frecuencia dominante de las ondas sísmicas generadas por la fuente durante el movimiento de fluidos magmáticos. Para la mayoría de los casos también se obtuvieron las frecuencias de sobretonos o sub-armónicos que presentaba el espectro, llegando a presentar hasta 5 sub-armónicos.

En total se revisaron 99 episodios de tremor, en su mayoría armónico. De estos episodios se analizaron 990 segmentos por componente, tomando en cuenta que son dos estaciones con tres componentes cada una, hacen un total de 5940 segmentos analizados. Por cada espectro y espectrograma se generó un archivo \*.fig, por componente y estación. En total se generaron 5626 figuras, que se guardaron como imágenes con la extensión jpg, las cuales se anexan en un cd ya que son demasiadas para presentarlas todas en este trabajo escrito.

Como se puede observar la Figura 3.3 es una de las figuras generadas y almacenada como imagen, esta consta de 4 partes: la primera, el encabezado, el cual contiene el nombre del archivo, el número de muestras utilizado en la ventana de análisis, si es que se le aplicó un filtro o no y la frecuencia de muestreo; además presenta los parámetros utilizados para generar el análisis tiempo-frecuencia (espectrograma) y el análisis espectral (espectro de Fourier). En la segunda parte se muestra la gráfica de la señal en el tiempo, de esta parte se tomó la amplitud pico a pico. En la tercera parte se muestra el periodograma, que esta graficado tiempo [seg] vs frecuencia [Hz] y como encabezado tiene el método usado para su obtención. Finalmente la cuarta parte corresponde al espectro, graficado Frecuencia [Hz] vs Amplitud Normalizada y en la esquina superior derecha muestra el método que se utilizó para calcular el mismo.

A continuación se presentan algunas imágenes, las cuales contienen la señal, el espectro y espectrograma de algunos episodios de tremor:

CAPITULO 3. ANÁLISIS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR

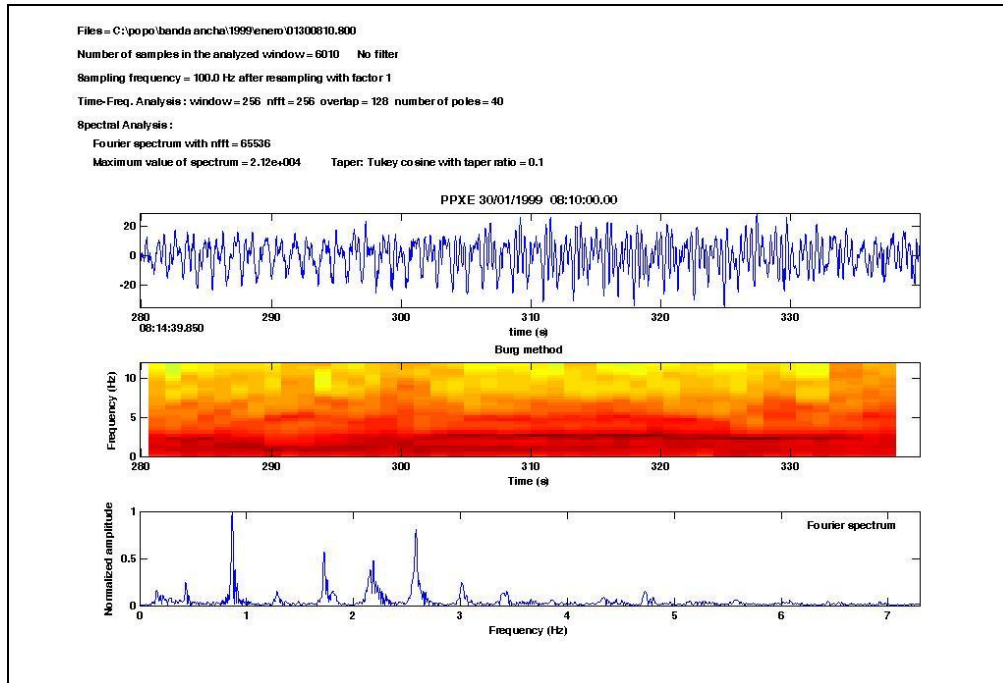


Figura 3.3 Segmento de tremor armónico registrado el 30 de enero de 1999 por la estación Chiquixtle en su componente este (PPXE)

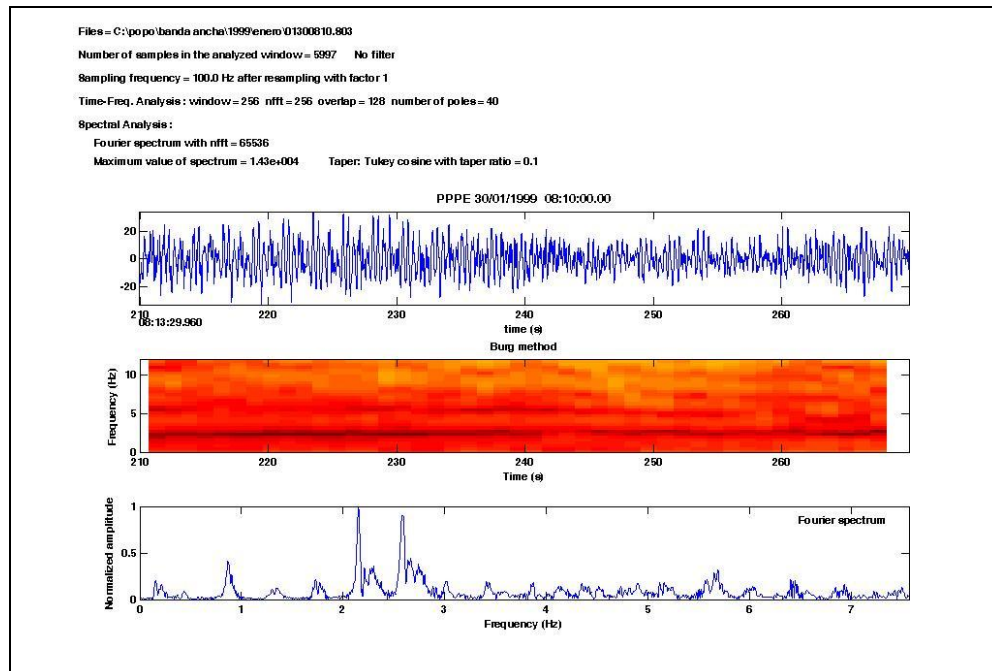


Figura 3.4 Segmento de tremor armónico registrado el 30 de enero de 1999 por la estación Canario en su componente este (PPPE)

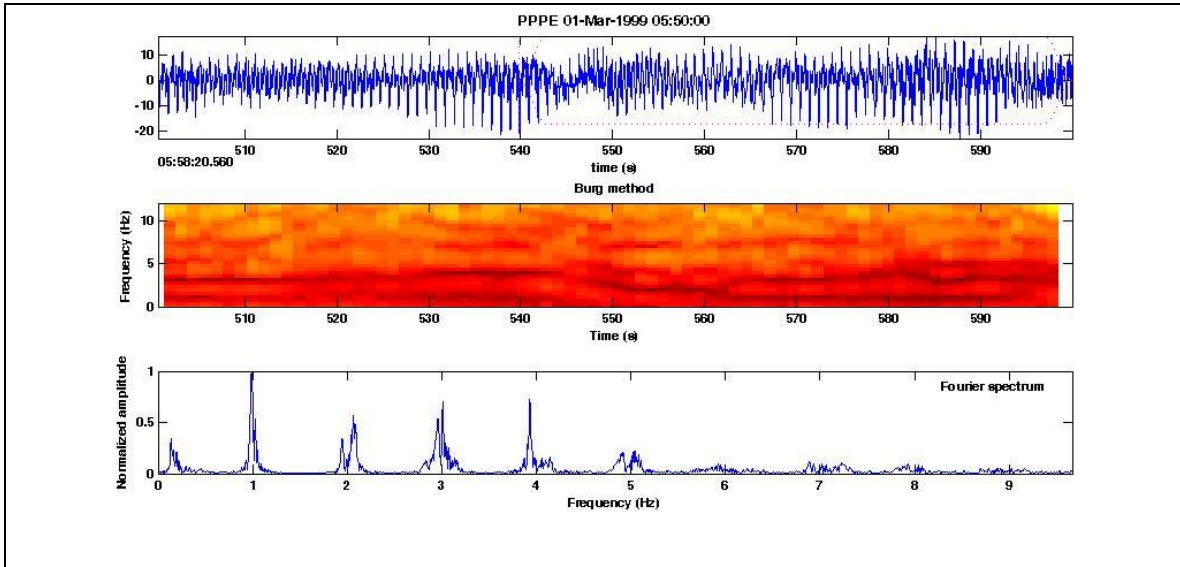


Figura 3.5 Segmento de tremor registrado el 1° de marzo de 1999 por la estación Canario en su componente este (PPPE)

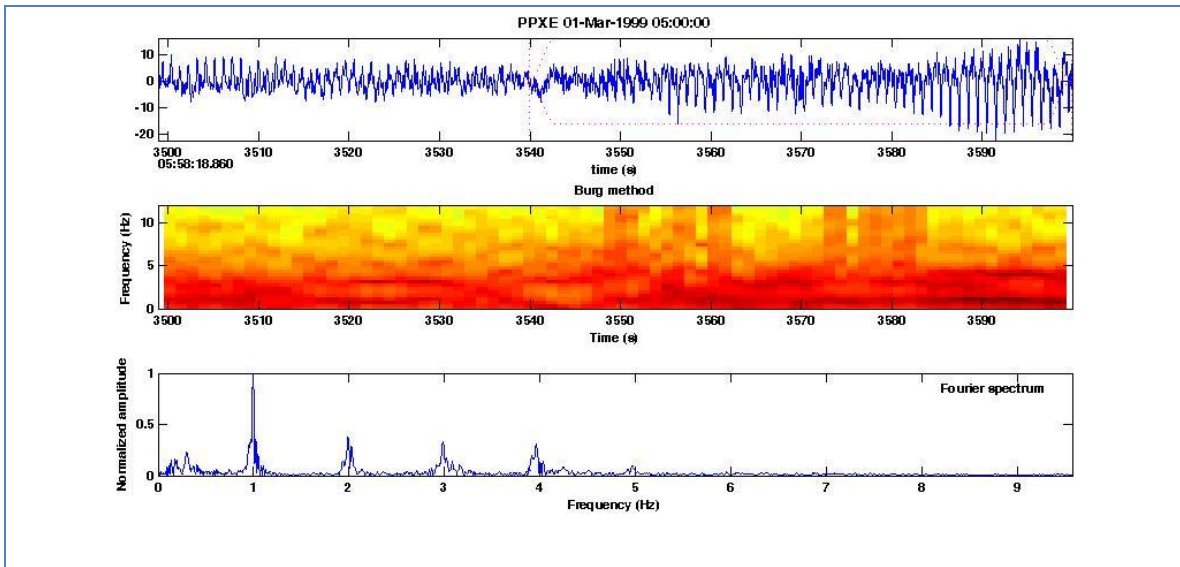


Figura 3.6 de tremor registrado el 1° de marzo de 1999 por la estación Chiquipixtle en su componente este (PPXE)

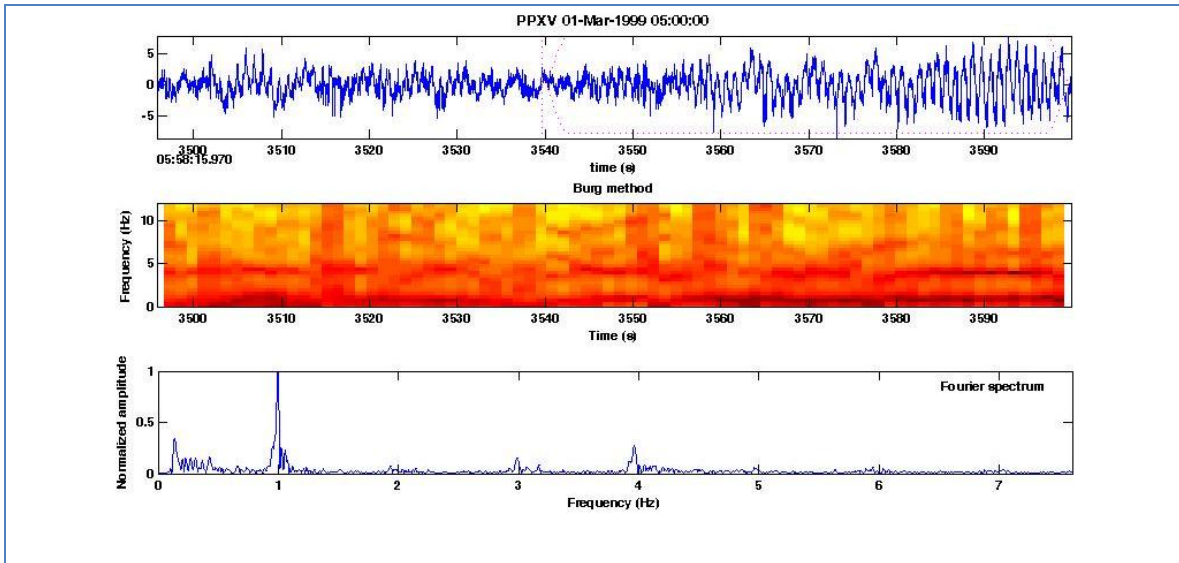


Figura 3.7 Segmento de tremor registrado el 1° de marzo de 1999 por la estación Chiquipixtle en su componente vertical (PPXV)

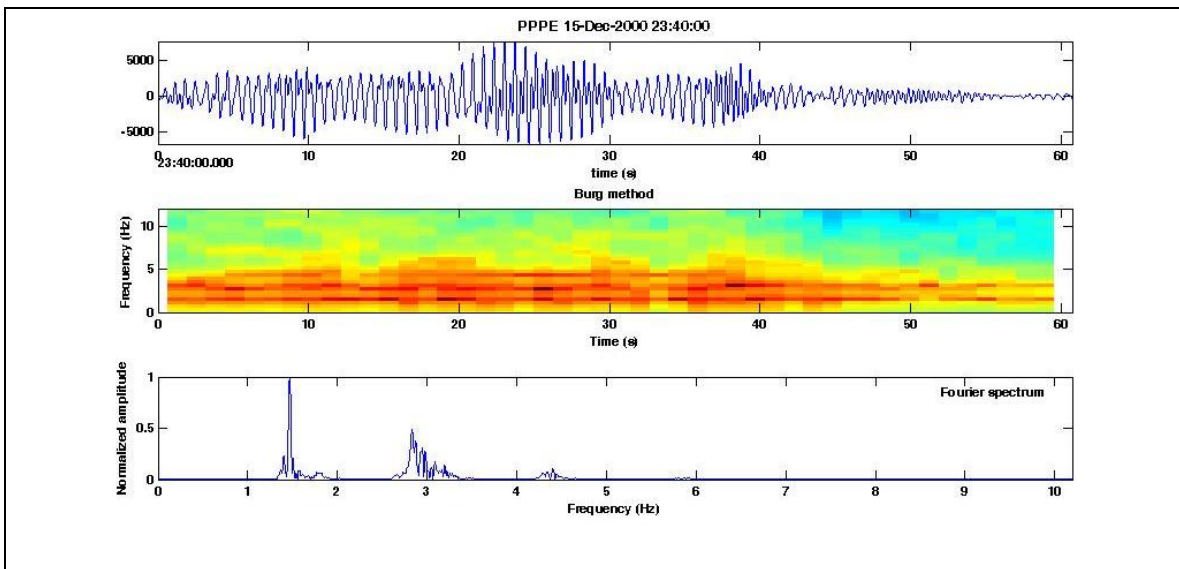


Figura 3.8 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Canario en su componente este (PPPE).



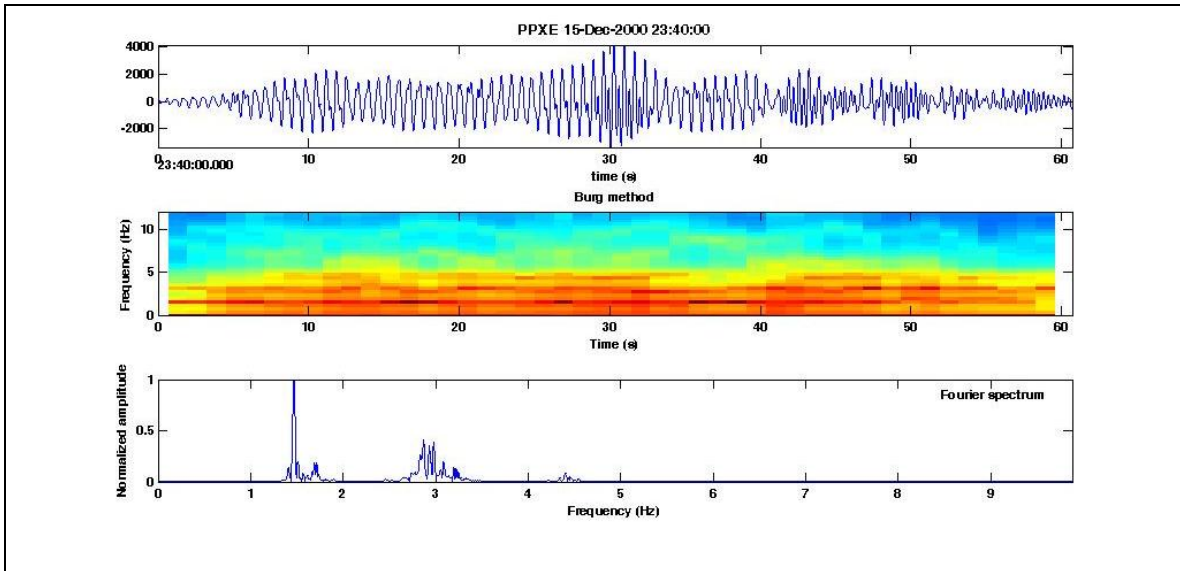


Figura 3.9 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Chiquipixtle en su componente este (PPXE).

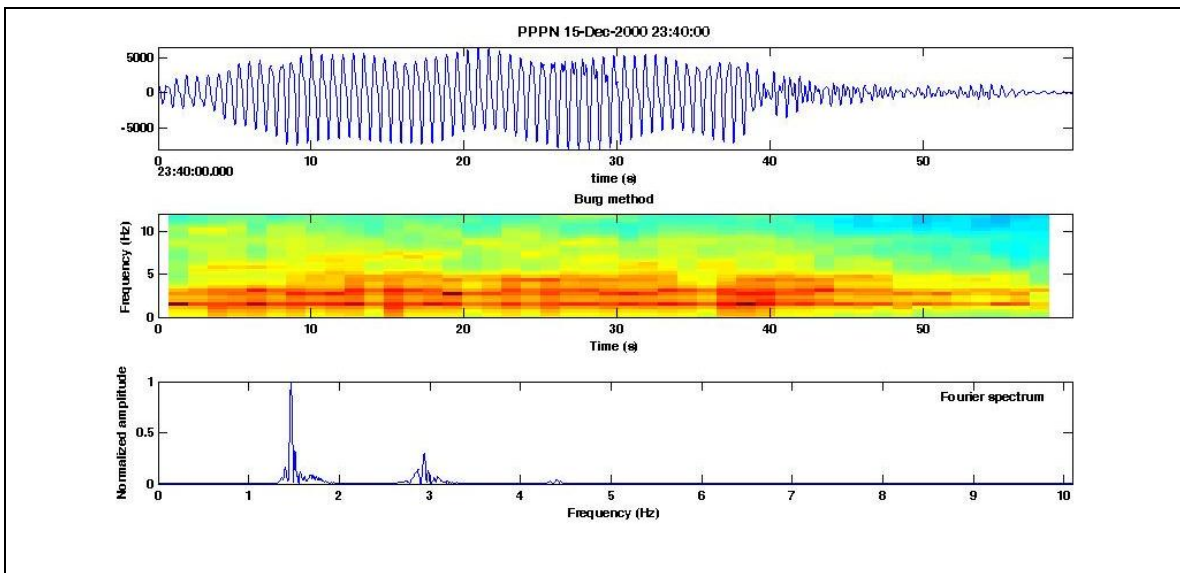


Figura 3.10 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Canario en su componente norte (PPPN).

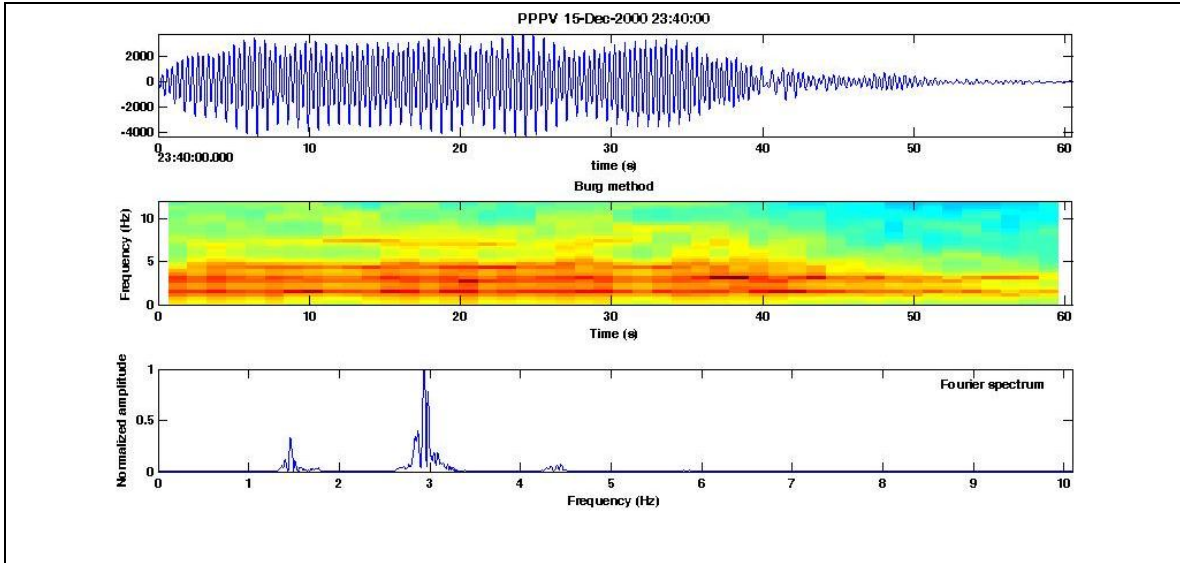


Figura 3.11 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Canario en su componente vertical (PPPV).

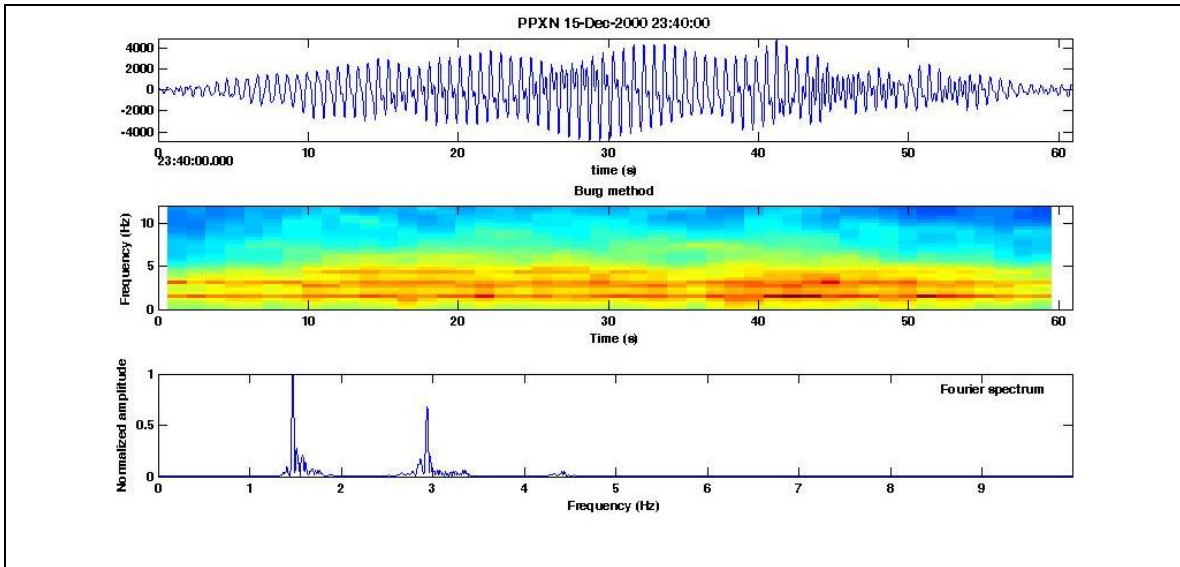


Figura 3.12 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Chiquipixtle en su componente norte (PPXN).

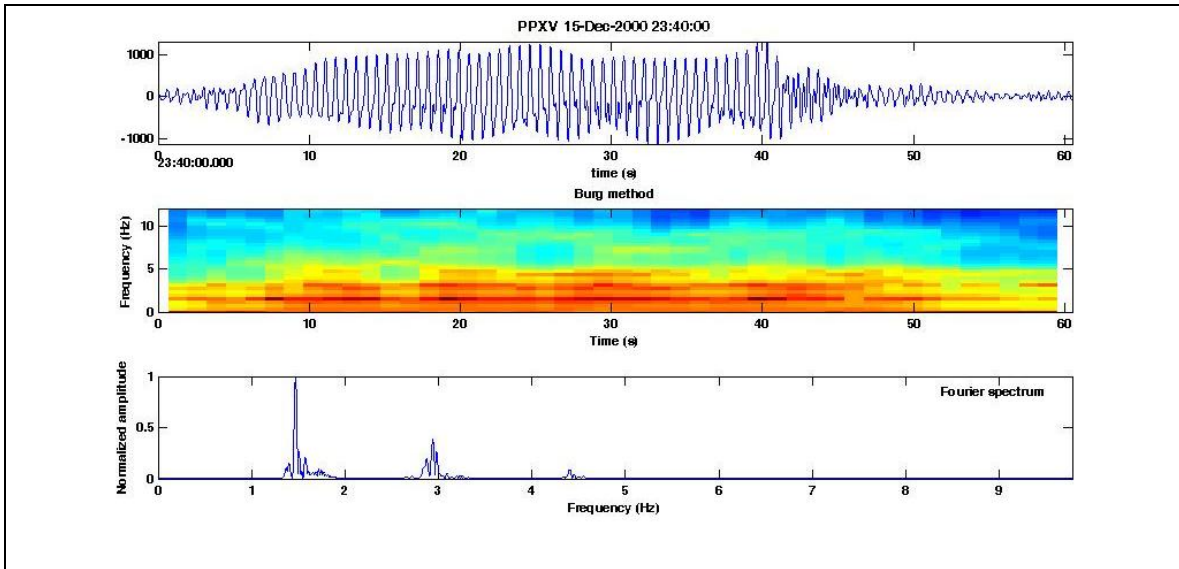


Figura 3.13 Segmento de tremor registrado el 15 de diciembre del 2000 por la estación Chiquipixtle en su componente vertical (PPXV).