UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPECTRAL: APLICADO A LAS RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 2001

Tesis presentada por la bachiller en Ciencias Geofísicas:
María Lourdes Delgado Ñahui
Para optar el Título Profesional de
INGENIERO GEOFÍSICO

AREQUIPA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPECTRAL: APLICADO A LAS RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 2001

Tesis presentada por la bachiller en Ciencias Geofísicas:
María Lourdes Delgado Ñahui
Para optar el Título Profesional de
INGENIERO GEOFÍSICO

Asesor interno: Dr. Armando Minaya
Asesor externo: Dr. Hernando Tavera

AREQUIPA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPECTRAL: APLICADO A LAS RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 2001

Tesis presentada por la bachiller en Ciencias Geofísicas:
María Lourdes Delgado Ñahui
Para optar el Título Profesional de
INGENIERO GEOFÍSICO

JURADOS

PRESIDENTE: Msc. Edgar Gonzales Zenteno
VOCAL: Dr. Orlando Macedo Sánchez
SECRETARIO: Ing. Javier Ticona Paucara

AREQUIPA – PERÚ

2018

Dedicado a María y Luis

Mis padres

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar le doy gracias a Dios por la vida. Durante el tiempo de la realización de la presente investigación recibí el apoyo de muchas personas, cada una me dejó una enseñanza y un recuerdo.

Agradezco a mi madre María quién siempre me inculcó la responsabilidad y el trabajo, a mi padre Luis porque siempre me impulsa a seguir adelante, a mi hermana Flor de María por su apoyo, a Mariana y Teo que me contagian su alegría.

Un agradecimiento especial al Presidente Ejecutivo del Instituto Geofísico del Perú Dr. Hernando Tavera Huarache quién depositó su confianza en mí, me orientó en el desarrollo de la investigación y siempre estuvo presto a responder mis dudas. Quiero agradecer a las personas que laboran en la Sub- Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida y en la Sub-Dirección de Redes Geofísicas del Instituto Geofísico del Perú. Asimismo agradecer al Dr. Armando Minaya Lizárraga asesor interno del trabajo de investigación.

En los años que viví en la ciudad de Lima me brindaron su mano amiga las señoras Alicia Flores y María Elena Martínez, siempre me trataron como una hija, gracias por su amistad y cariño a mis compañeras de piso Isela, Carmen, Janeth y Diana siempre las recordaré.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS ix

LISTA DE TABLAS xv

RESUMEN xvi

ABSTRACT xvii

CAPÍTULO I 1

INTRODUCCIÓN 1

1.1. ÁREA DE ESTUDIO 4

1.2. JUSTIFICACIÓN 6

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 6

1.4. OBJETIVOS 6

1.4.1. Objetivo general 6

1.4.2. Objetivos específicos 6

1.5. METODOLOGÍA 7

1.6. ANTECEDENTES 7

CAPÍTULO II 9

GEODINÁMICA 9

2.1. CONTEXTO GEODINÁMICO 9

2.1.1. La Dorsal de Nazca 10

2.1.2. La Fractura de Mendaña 10

2.1.3. La Fosa Perú-Chile 10

2.1.4. La Cordillera Andina 11

2.1.5. La Cadena Volcánica 13

2.1.6. Sistemas de Fallas 13

CAPÍTULO III 16

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA SISMICIDAD EN PERÚ 16

3.1. SISMICIDAD HISTÓRICA 16

3.2. SISMICIDAD INSTRUMENTAL 17
3.3. PRINCIPALES SISMOS DESTRUCTORES EN EL SUR DEL PERÚ 20
3.4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS SISMOS 22
3.5. ESQUEMA SISMOTECTÓNICO DEL PERÚ 24

CAPÍTULO IV 26
TERREMOTO DEL 23 DE JUNIO DEL 2001 26
4.1. PARÁMETROS DEL HIPOCENTRO Y RÉPLICAS 26
4.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE RÉPLICAS 27
4.3. ORIENTACIÓN DE LA RUPTURA 30
4.3.1. Sismo Principal 31
4.3.2. Réplica del 26 de Junio 32
4.3.3. Réplica del 5 de Julio 33
4.3.4. Réplica del 7 de Julio 33
4.4. TSUNAMI 35

CAPÍTULO V 37
DINÁMICA Y PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA 37
5.1. MODELOS DE FUENTE SÍSMICA 37
5.1.1. Modelo de Barreras 37
5.1.2. Modelo de Asperezas 38
5.2. MODELOS DE RUPTURA CIRCULAR 39
5.2.1. Modelo de Brune 39
5.2.2. Modelo de Madariaga 42
5.3. PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA 43
5.3.1. Momento sísmico escalar 43
5.3.2. Radio de fractura 44
5.3.3. Caída de esfuerzos 45
5.3.4. Energía sísmica 47

CAPÍTULO VI 49
ANÁLISIS DE SEÑALES SÍSMICAS 49

6.1. REGISTROS SÍSMICOS 49
6.2. CORRECCIONES DE LOS REGISTROS SÍSMICOS 50
6.2.1. Corrección de línea base 50
6.2.2. Corrección instrumental 50
6.3. EL RUIDO SÍSMICO 53
6.3.1 Ruido cultural 53
6.3.2 Ruidos de Periodo Corto 54
6.3.3 Ruidos de Periodo Largo 55
6.3.4 Filtros 55
6.3.4.1 Tipos de filtros 57
6.4. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER 59
6.5. ANÁLISIS ESPECTRAL 61

CAPÍTULO VII 63
APLICACIÓN A LAS RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 2001 63
7.1. RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA 63
7.2. RED SÍSMICA LOCAL 64
7.3. BASE Y ANÁLISIS DE DATOS 66
7.4. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA 67
7.5. RESULTADOS 68
7.5.1. Estación Tocota 68
7.5.2. Estación Ocoña 68
7.5.3. Estación Caravelí 71
7.5.4. Estación Bella Unión 71
7.5.5. Estación Quilca 71
7.6. MOMENTO SÍSMICO VS RADIO DE LA FRACTURA 80
7.6.1. Estación Tocota 80
7.6.2. Estación Ocoña 81
7.6.3. Estación Caravelí 82
7.6.4. Estación Bella Unión 83

7.6.5. Estación Quilca 84

CAPÍTULO VIII 86
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN 86
8.1. Interpretación 86
CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS
ANEXO 1
ANEXO 2

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del área de estudio, epicentro del terremoto del 2001 y su serie de réplicas..... 5

Figura 2.1. Principales unidades geomorfológicas presentes en el Perú (Dalmayrac et al., 1988; Tavera y Buforn, 1998)..... 12

Figura 2.2. Mapa de ubicación de los principales sistemas de fallas del Perú (Macharé et al., 2003)..... 15

Figura 3.1. Distribución espacial de grandes terremotos ocurridos en el borde occidental del Perú, periodo instrumental (1960-2010). Las barras de color azul indican los sismos que produjeron tsunami..... 19

Figura 3.2. Mapa sísmico de Perú periodo 1960-2017. Fuente Instituto Geofísico del Perú..... 23

Figura 3.3. Esquema sismotectónico del Perú. a) Subducción subhorizontal en el Norte y Centro del Perú b) Subducción normal en el Sur del Perú. El círculo rojo representa el sismo de Arequipa del 2001 (Mattauer, 1989)..... 25

Figura 4.1. Mapa de isosistas del terremoto de Arequipa (Tavera et al., 2002)..... 27

Figura 4.2. Distribución espacial del epicentro del evento principal y réplicas relocalizadas del terremoto del 23 de Junio del 2001. Los mecanismos focales fueron obtenidos usando registros telesísmicos. El área rayada corresponde a las réplicas del terremoto de Noviembre de 1996 (Tavera et al., 1998) y la sombreada, al área que no ha experimentado ruptura durante el terremoto del 23 de Junio. Los grupos de réplicas están delimitados por líneas punteadas. La fecha y magnitud están ubicadas encima de cada mecanismo focal (Tavera et al., 2006)..... 29

Figura 4.3. Mecanismos focales simples y compuestos elaborados a partir de la polaridad de la onda P para los tres grupos de réplicas mostradas en la Figura 4.2. P y T corresponden a los ejes de presión y tensión (Tavera et al., 2006)..... 30

Figura 4.4. Formas de onda, observadas y sintéticas correspondientes al terremoto. El código de la estación está en el extremo izquierdo del registro, la distancia epicentral.

La esfera focal corresponde a su proyección en el hemisferio inferior, siendo P y T ejes representados por círculos negros y blancos. La STF es presentada bajo el mecanismo focal. En la parte superior, el mecanismo focal corresponde a dos eventos sísmicos (E1, E2), así como la solución a partir de la polaridad de la onda P (Tavera, 2002)..... 32

Figura 4.5. Resultados del modelamiento de ondas P para las réplicas del terremoto de Arequipa a) 26 de Junio, b) 5 de Julio y c) 7 de Julio (Tavera et al., 2002) 34

Figura 4.6. Principales parámetros y características del tsunami que afectó la localidad de Camaná en Arequipa. Las líneas perpendiculares a la línea de Costa indican la máxima altura de las olas. El área sombreada corresponde al área inundada por el tsunami (Tavera et al., 2006)..... 36

Figura 5.1. Modelos de ruptura sísmica, a) Barreras y b) Asperezas. De arriba hacia abajo se muestra el plano de falla, el estado de los esfuerzos antes y después de la ruptura, asimismo el deslizamiento producido, (Redibujado de Tavera, 1992)..... 38

Figura 5.2. Modelo de Brune para una falla circular 40

Figura 5.3. Sismogramas y espectros para cinco réplicas del terremoto de San Fernando (1971). Las flechas debajo de los sismogramas indican la parte de la onda S utilizada para el espectro de Fourier (Brune, 1973)..... 41

Figura 5.4. Modelo de Madariaga para una falla circular 42

Figura 5.5. Esfuerzos (a) antes y (b) después de la ocurrencia de la ruptura. $\Delta\mu$ es el deslizamiento y $\Delta\sigma$ la caída de esfuerzos (Aki y Richards, 2002) 45

Figura 6.1. Ejemplo del registro de un sismo en el campo cercano. P y S, corresponden a los tiempos de llegada de ambas fases 49

Figura 6.2.a) Registro de velocidad sin corregir para una réplica del terremoto de Arequipa del 2001, obsérvese que el registro se encuentra por debajo de la línea base; **b)** Registro de velocidad, al cual se aplicó la corrección de línea base 50

Figura 6.3. Representación del cálculo de un sismograma teórico para una fuente puntual en el campo lejano. La función temporal de la fuente sísmica (F(t)) se combina

con la atenuación del medio (Q(t)) y el instrumento (I(t)) mediante una operación de convolución (Tavera, 1998) 51

Figura 6.4. Ficha técnica de un sismómetro Guralp 40T 52

Figura 6.5.a) Registro de la réplica del sismo de Arequipa del 2001 sin corrección instrumental, la amplitud está expresada en cuentas/s. **b)** El mismo registro, al cual se aplicó la corrección instrumental, la amplitud expresada en cm/s 53

Figura 6.6. Registros de réplicas del sismo de Arequipa con diferentes niveles de ruido sísmico (rectángulo sombreado) 54

Figura 6.7. Caracterización en el dominio de la frecuencia de un filtro paso-bajo ideal y uno no ideal 56

Figura 6.8. Respuesta frecuencial del filtro Paso-Alto, (fc) es la frecuencia de corte 57

Figura 6.9. Respuesta de un filtro Paso-Bajo 58

Figura 6.10. Respuesta de un filtro Paso-banda 58

Figura 6.11. Respuesta de un filtro Elimina-banda 59

Figura 6.12. Modificación de la señal en el proceso de aplicación ideal de la Transformada Rápida de Fourier (Brigham, 1988) 60

Figura 6.13. Espectros para dos réplicas del terremoto de Arequipa, la primera registrada el 29 de Junio en la estación Tocota y la segunda registrada el 01 de Julio en la estación Caravelí. En el eje de las abscisas, la frecuencia está en Hz y en el eje de ordenadas, las amplitudes en cm.se, **Ω** es la parte plana del espectro y fc la frecuencia esquina..... 61

Figura 7.1. Epicentros de la serie de réplicas del terremoto de Arequipa del 2001 64

Figura 7.2. Distribución de estaciones sísmicas que integran la Red Sísmica Local. La estrella indica el epicentro del sismo principal..... 65

Figura 7.3. Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Tocota, N-S (Componente Norte-Sur) y E-O (Componente Este-Oeste)..... 69

Figura 7.4. Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Ocoña, N-S (Componente Norte-Sur) y E-O (Componente Este-Oeste)..... 70

Figura 7.5. Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Caravelí, N-S (Componente Norte-Sur) y E-O (Componente Este-Oeste)..... 72

Figura 7.6. Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Bella Unión, N-S (Componente Norte-Sur) y E-O (Componente Este-Oeste) 73

Figura 7.7. Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Quilca, N-S (Componente Norte-Sur) y E-O (Componente Este-Oeste)..... 74

Figura 7.8. Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Tocota..... 80

Figura 7.9. Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Ocoña 81

Figura 7.10. Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Caravelí 82

Figura 7.11. Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Bella Unión 83

Figura 7.12. Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Quilca 84

Figura 8.1. Relación entre área de ruptura y momento sísmico. Las líneas 0.1, 1, 10 y 100 MPa muestran una caída de esfuerzos (Δσ) constante, (Kanamori y Anderson, 1975) 87

Figura 8.2. Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar y el área de la fractura para terremotos con foco superficial, (Tavera, 1998) 88

Figura 8.3. Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), (Abercrombie y Leary, 1993) 89

Figura 8.4.a) Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Tocota. Modificado Abercrombie y Leary, (1993) 90

Figura 8.4.b) Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Ocoña. Modificado Abercrombie y Leary, (1993) 91

Figura 8.4.c) Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Caravelí. Modificado Abercrombie y Leary, (1993) 92

Figura 8.4.d) Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Bella Unión. Modificado Abercrombie y Leary, (1993) 92

Figura 8.4.e) Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Quilca. Modificado Abercrombie y Leary, (1993) 93

Figura 8.5. Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior). Las líneas rojas corresponden a caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100 Mpa (Allman y Shearer, 2009). 94

Figura 8.6.a) Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Tocota. Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado de Allman y Shearer, 2009) 96

Figura 8.6.b) Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Ocoña. Las

líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado Allman y Shearer, 2009) 96

Figura 8.6.c) Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Caravelí. Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado Allman y Shearer, 2009) 97

Figura 8.6.d) Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Bella Unión. Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado Allman y Shearer, 2009) 98

Figura 8.6.e) Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Quilca. Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado Allman y Shearer, 2009) 98

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1. Magnitudes en comparación con la energía sísmica liberada y la cantidad de TNT 47

Tabla 6.1. Parámetros instrumentales de las estaciones de la Red Sísmica Local 52

Tabla 7.1. Coordenadas de estaciones sísmicas de banda ancha que integran la red sísmica local 66

Tabla 7.2. Modelo de velocidad utilizado en este estudio 67

Tabla 7.3. Parámetros de la fuente sísmica de réplicas de la estación Tocota 75

Tabla 7.4. Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas registradas en la estación Tocota 81

Tabla 7.5. Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas de la estación Ocoña 82

Tabla 7.6. Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas de la estación Caravelí 83

Tabla 7.7. Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas de la estación Bella Unión 84

Tabla 7.8. Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas de la estación Quilca 85

RESUMEN

Los parámetros de la fuente sísmica de las réplicas del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001 (Mw=8.2), son determinados a partir de la aplicación de la técnica de análisis espectral. Los datos utilizados corresponden a 292 réplicas registradas por la Red Sismológica Nacional y una Red Sísmica Local integrada por 9 estaciones a cargo del Instituto Geofísico del Perú. Todas las réplicas presentaron magnitudes ML menores a 5.5 y focos ubicados a profundidades menores a 60Km. Después de corregir por línea base y efecto instrumental, los espectros de Fourier fueron obtenidos para el tren de ondas S de acuerdo a Keilis-Borok (1959) y Brune (1970).

Los resultados obtenidos muestran que las réplicas presentan valores para el momento sísmico escalar en el rango de $3.45x10^{12}$ a $1.63x10^{17}$N.m; el radio de fractura entre 0.19 a 4.98km; los valores de caída de esfuerzos están comprendidos entre 0.13 y 98.76Mpa, la Magnitud Momento Sísmico presenta valores entre 2.36 y 5.48Mw y la Magnitud Energía, valores entre 3.27 y 4.47Me. Los valores de caída de esfuerzos para la mayoría de réplicas del terremoto de Arequipa analizadas en este estudio se encuentran entre 0.1 a 100Mpa. Estos valores son coherentes con los parámetros de la fuente propuestos por otros investigadores.

Asimismo, indicar que todos los eventos sísmicos presentan similares valores de caída de esfuerzos.

Palabras Clave: Réplicas del Terremoto de Arequipa, análisis espectral, caída de esfuerzos.

ABSTRACT

The seismic source parameters of the aftershocks of Arequipa's Earthquake of June 23, 2001 (Mw=8.2), they are determinate from the application of the technique of spectral analysis. The database used corresponds to 292 aftershocks registered by the Seismological National Network and a Seismic Local Network integrated by 9 stations in charge of the Geophysical Institute of Peru. All the aftershocks presented magnitudes minor to 5.5ML and focus located to minor depths to 60Km. After correcting for base line and instrumental effect, Fourier's spectra were obtained for the record S wave according to Keilis-Borok (1959) and Brune (1970).

The obtained results present that the aftershocks have values for the seismic moment scalar in the range of $3.45x10^{12}$ to $1.63x10^{17}$N.m; the fracture's radius between 0.19 to 4.98km; the values of stress drop are between 0.13 and 98.76Mpa, the Seismic Magnitude Moment presents values between 2.36 and 5.48Mw and the Energy Magnitude, values between 3.27 and 4.47Me. The values of stress drop for the most of aftershocks of Arequipa's earthquake analyzed in this study are between 0.1 to 100Mpa. These values are coherent with the parameters of the source proposed by other investigators.

Likewise, to indicate that all the seismic events present similar values of stress drop.

Key words: Aftershocks of Arequipa's Earthquake, spectral analysis, stress drop.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica del Perú está asociada al proceso de subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana. La velocidad de convergencia de las placas es de 6cm/año (Norabuena et al., 1998), esta fuente da origen al mayor número de sismos así como los de mayor magnitud. En el año 2001, un sismo de magnitud 8.2Mw, con origen en esta fuente afectó la región Sur del Perú, el mismo que por sus características define un proceso complejo de ruptura. Este proceso se puso en evidencia con el gran número de réplicas que en conjunto permiten estimar parámetros propios del mismo proceso.

Durante el periodo del 27 de junio al 31 de julio del 2001, el Instituto Geofísico del Perú usando una Red Sísmica Local, registró 292 réplicas con magnitudes comprendidas entre 2.4 y 5.5ML. Espacialmente estas réplicas definen un área de ruptura de 300x120km^2 con evidente propagación de la ruptura en dirección SE. Por lo tanto se hace necesario estudiar los parámetros de la fuente de estas réplicas.

A medida que ha ido aumentando la precisión en la localización de los epicentros de sismos, se extendió la idea de que la causa de los terremotos es la acumulación de esfuerzos en la corteza terrestre, previos a su ruptura. En tal sentido, surge la necesidad de modelos físico-matemáticos con los cuales se pueda representar este proceso. Los modelos dinámicos más sencillos corresponden a fracturas homogéneas, en las que el desplazamiento comienza en un punto interior y se detiene en los bordes; dando origen a una rápida caída de esfuerzos al ser

superada la resistencia del material. La caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$) es un parámetro importante de la fuente sísmica ya que representa la parte de los esfuerzos que produce la fractura y la radiación de energía en forma de ondas elásticas. La mayor o menor intensidad de la energía dependerá de las dimensiones del área afectada (A), de la rigidez del medio (μ) y del desplazamiento (ΔU), producto de la ruptura. El producto de estos parámetros define el momento sísmico, $Mo=\mu.A.\Delta U$.

En la actualidad, los registros digitales permiten elaborar espectros de señal sísmica, siempre que se disponga de la respuesta instrumental, de manera que su análisis y el uso de un modelo de fractura, permiten evaluar los parámetros de la fuente. En ese orden de ideas los parámetros como Mo, el radio de la fractura y la caída de esfuerzos se pueden obtener en base a la parte plana (Ω) y la frecuencia esquina (Fc) del espectro.

Estudios realizados por Kanamori y Anderson (1975), permitieron formular relaciones empíricas para definir los parámetros de la fuente de terremotos, concluyendo que la caída de esfuerzos está comprendida entre 3 y 10Mpa, siendo constante para sismos intraplaca e interplaca. Del mismo modo, Archuleta et al., (1982), aplicando la técnica del Análisis espectral y usando el modelo de Brune, determinaron los parámetros de la fuente de terremotos ocurridos en el Lago Mammoth (California), y en este caso la caída de esfuerzos es constante en 50bars.

Por otro lado, Mori y Frankel (1990), utilizando funciones de Green para estimar los parámetros de sismos con magnitudes comprendidas entre 3.4 y 4.4ML, ocurridos en Palm Spring (California), indican que la caída de esfuerzos se encuentra en el rango de 3 a 80bars. De manera similar Hough et al., (1991), estudiando las réplicas del terremoto de Loma Prieta (1989), determinan que la caída de esfuerzos se da en el rango de 6 a 266bars. Abercrombie y Leary (1993), analizaron en detalle la variación de los valores de caída de esfuerzos para 800 sismos de variada magnitud (1.5 a 7ML), ocurridos en California, concluyendo

que la caída de esfuerzos varía en un rango entre 0.1 y 100Mpa. En el caso de Perú, un estudio realizado por Tavera (1998) analizó la caída de esfuerzos de grandes terremotos con foco superficial, intermedio y profundo ocurridos en el Perú durante el periodo de 1980 a 1995, determinando que todos los terremotos con foco a profundidad superficial presentan esfuerzos medios aparentes entre 0.1Mpa y 10Mpa, similar a los definidos en estudios anteriores.

En este estudio se evalúa los parámetros de la fuente de las réplicas del terremoto de Arequipa del 2001, obtenidos aplicando la técnica del Análisis espectral.
El desarrollo de esta investigación se ha estructurado en ocho capítulos:

En el **Capítulo I**, se realiza la presentación de la metodología a desarrollar en este estudio: Aplicación del método de análisis espectral a las réplicas del terremoto de Arequipa del 2001.

El **Capítulo II** está dedicado al contexto geodinámico del Perú, considerando sus principales rasgos tectónicos y las unidades estructurales responsables de la geodinámica actual.

En el **Capítulo III**, se explican las características generales de la sismicidad histórica e instrumental del Perú. Se describe la distribución espacial de los sismos y análisis de los principales sismos destructores que han afectado la zona Sur del Perú, finalmente se analiza el esquema sismotectónico del Perú.

En el **Capítulo IV**, se analiza el proceso de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001, sus parámetros hipocentrales y el proceso complejo de ruptura. Asimismo, las características del tsunami.

En el **Capítulo V**, se describe la dinámica de la fuente sísmica así como los modelos de ruptura sísmica de Brune y Madariaga. Se explica la teoría para estimar los parámetros de la fuente sísmica como: Momento sísmico escalar, Radio de fractura, Caída de esfuerzos y Energía sísmica.

El **Capítulo VI** está dedicado al análisis de las señales sísmicas, correspondientes a las réplicas, correcciones instrumentales, tipos de ruidos y filtros, y la técnica del Análisis Espectral.

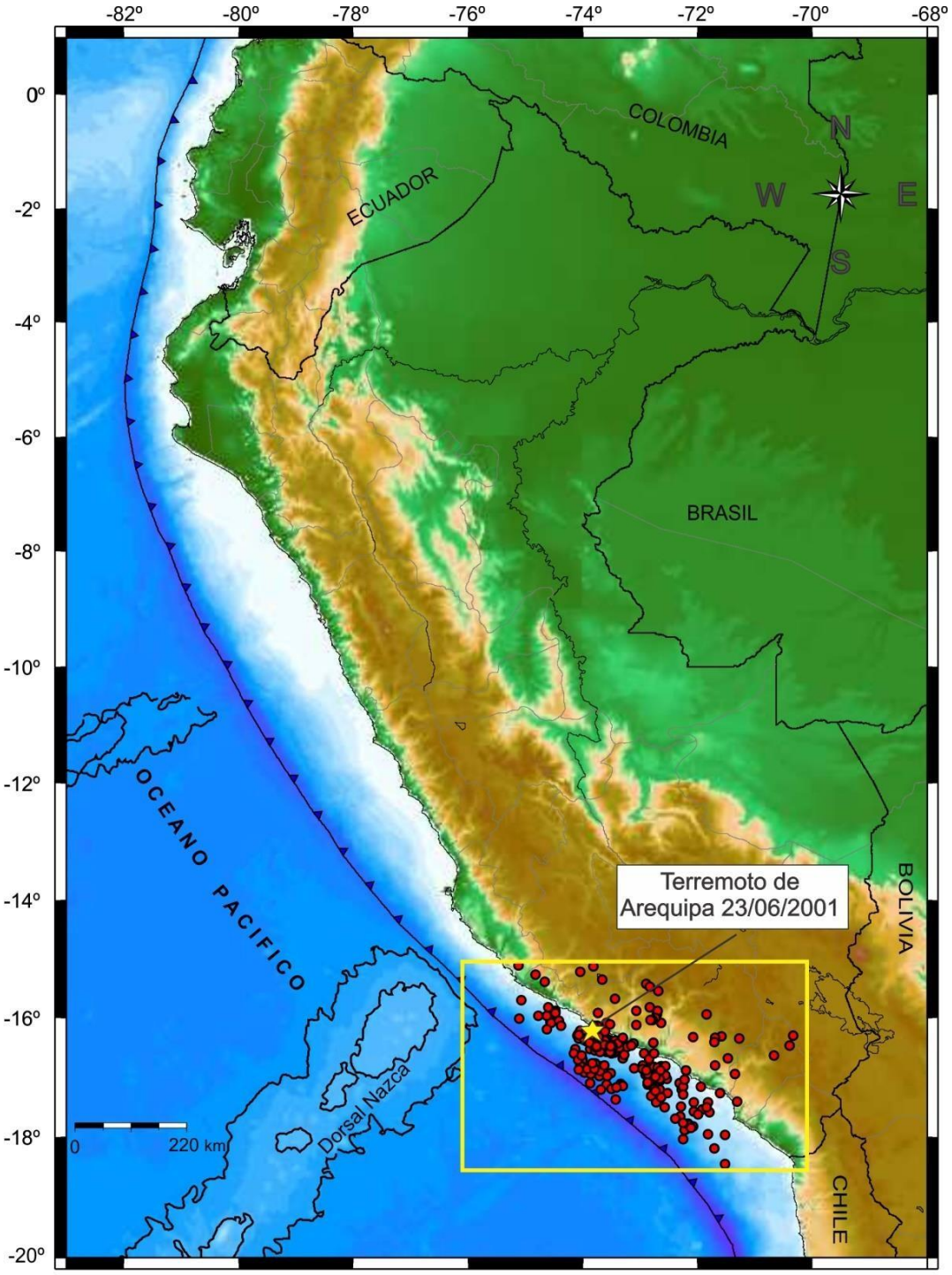
El **Capítulo VII**, se detalla la metodología usada para aplicar la técnica del Análisis espectral a las réplicas del terremoto de Arequipa del 2001. Se presentan los resultados obtenidos y se analiza la relación Momento sísmico versus radio de la fractura.

En el **Capítulo VIII**, se analizan los resultados obtenidos y se correlacionan con otras investigaciones realizadas a nivel mundial.
Finalmente, las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación.

1.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en la región sur del Perú, entre las coordenadas -15º y -18.5º Latitud sur, -70º y - 76º Longitud oeste. En esta área ocurrió el terremoto del 2001 y serie de réplicas registradas por la Red Sísmica Nacional y una Red Sísmica Local a cargo del Instituto Geofísico del Perú. (Figura 1.1).

Los círculos rojos corresponden a las 292 réplicas, la estrella en amarillo representa al sismo principal y el recuadro en amarillo es el área de estudio.



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA	
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, GEOFÍSICA Y MINAS	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA	
"DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPECTRAL: APLICADO A LAS RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 2001"	
Realizado por: Bach. María Lourdes Delgado Ñahui	Fecha: Julio 2018
Escala: 1/220	Figura1.1

Figura 1.1. *Ubicación del área de estudio, epicentro del terremoto del 2001 y su serie de réplicas.*

1.2. JUSTIFICACIÓN

En el Perú los sismos en su mayoría se originan por el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana siendo la fuente sismogénica primaria que da origen a la mayor cantidad de sismos así como los de mayor magnitud, el terremoto de Arequipa del año 2001 de magnitud 8.2Mw se originó en esta fuente, durante el periodo del 27 de junio al 31 de julio del 2001 el Instituto Geofísico del Perú registró 292 réplicas las cuales definen un área de ruptura de 300x120km^2, de aquí la importancia de determinar los parámetros de la fuente sísmica de las réplicas del terremoto de Arequipa del 2001.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación busca desarrollar una metodología para analizar y estudiar los parámetros de la fuente sísmica de 292 réplicas del terremoto de Arequipa del 2001, obtenidos a partir del análisis espectral, examinando con detalle el comportamiento de los valores de caída de esfuerzos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

- Analizar y evaluar las características espectrales de las réplicas del terremoto de Arequipa del 2001.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar el proceso de ruptura del terremoto de Arequipa del 2001.
- Desarrollar una metodología para aplicar la técnica de análisis espectral a las réplicas del terremoto de Arequipa del 2001.
- Determinar los parámetros de la fuente sísmica de las réplicas del terremoto de Arequipa, como momento sísmico, radio de la fractura, magnitud momento, magnitud energía y caída de esfuerzos.
- Correlacionar los resultados obtenidos en el presente estudio con otros similares de Perú y a nivel mundial.

1.5. METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación se resume en los siguientes pasos:

_ Recopilación de la información bibliográfica del terremoto de Arequipa del 2001, y de los registros sísmicos de las réplicas.

_ Procesamiento de las señales sísmicas en el programa Seismic Analysis Code (SAC), elaboración de espectros sísmicos, aplicación del análisis espectral.

_ Determinación de los parámetros de la fuente sísmica de las réplicas del terremoto de Arequipa.

_ Análisis e interpretación de resultados.

1.6. ANTECEDENTES

En el caso de Perú, un estudio realizado por Tavera (1998) analizó la caída de esfuerzos de grandes terremotos con foco superficial, intermedio y profundo ocurridos en el Perú durante el periodo de 1980 a 1995, determinando que todos los terremotos con foco a profundidad superficial presentan caída de esfuerzos entre 0.7 y 10Mpa.

Estudios realizados por Kanamori y Anderson (1975), permitieron formular relaciones empíricas para definir los parámetros de la fuente de terremotos, concluyendo que la caída de esfuerzos está comprendida entre 3 y 10Mpa, siendo constante para sismos intraplaca e interplaca. De forma similar, Archuleta et al., (1982), aplicando la técnica del Análisis espectral y usando el modelo de Brune, determinaron los parámetros de la fuente de terremotos ocurridos en el Lago Mammoth (California), y en este caso la caída de esfuerzos es constante en 50bars.

Por otro lado, Mori y Frankel (1990), utilizando funciones de Green para estimar los parámetros de sismos con magnitudes comprendidas entre 3.4 y 4.4ML, ocurridos en Palm Spring (California), indican que la caída de

esfuerzos se encuentra en el rango de 3 a 80bars. Hough et al., (1991), estudiando las réplicas del terremoto de Loma Prieta (1989), determinan que la caída de esfuerzos se da en el rango de 6 a 266bars.

El estudio de Abercrombie y Leary (1993), analizó en detalle la variación de los valores de caída de esfuerzos para 800 sismos de variada magnitud (1.5 a 7ML), ocurridos en California y una recopilación de más de 800 sismos, concluyendo que la caída de esfuerzos varía en un rango entre 0.1 y 100Mpa.

CAPÍTULO II

GEODINÁMICA

2.1. CONTEXTO GEODINÁMICO

En Perú, los sismos se originan en dos fuentes sismogénicas: La primera está asociada al proceso de convergencia de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, y la segunda considera a los sismos que son producto de la deformación cortical, presente de Norte a Sur, sobre la Cordillera Andina y a lo largo de la zona Subandina, producto de la presencia de fallas geológicas.

La Placa de Nazca se desplaza con una velocidad aproximada de 6 a 7cm/año en dirección NE (DeMets, et al. 1990; Norabuena, et al. 1998), y permite que se produzca un fuerte acoplamiento entre las placas, generándose deformación y acumulación de energía que se libera con sismos de magnitud variada, a lo largo de la superficie de contacto y a diferentes profundidades. Las características de esta sismicidad han sido estudiadas por muchos autores: Stauder (1975), Barazangui y Isacks (1976), Hasegawa y Isacks (1981) Grange et al (1984), Schneider y Sacks (1987), Rodriguez y Tavera (1991) Cahill y Isacks (1992), Lindo (1993), Tavera (1998) y Tavera y Buforn (2001) y todos ellos concluyen que la subducción se realiza debido a importantes elementos tectónicos que controlan la geodinámica del borde Oeste de Sudamérica. Estos elementos son:

- La Dorsal de Nazca
- La Fractura de Mendaña
- La Fosa Peruano-Chilena
- La Cordillera Andina
- La Cadena Volcánica
- Sistemas de Fallas

A continuación, se describe las características principales de cada uno de estos elementos.

2.1.1. La Dorsal de Nazca, es una cordillera oceánica de forma asimétrica, localizada en el extremo NO de la región Sur de Perú con orientación NE-SO (entre 15º y 24ºSur). El extremo NE de la dorsal se ubica frente al departamento de Ica, a una distancia de 50km aproximadamente de la línea de fosa, teniendo sobre la cota de 2000metros un ancho de 220km aproximadamente. Su ancho y la altitud disminuyen en forma considerable en dirección SO y se considera que cotas menores ya subducieron bajo la placa continental (Sebrier et al., 1985).

Estudios sobre anomalías magnéticas, permiten considerar la hipótesis de que la Dorsal de Nazca debe su origen a una antigua zona de creación de corteza que cesó su actividad hace 5 a 10 millones de años aproximadamente (Marocco, 1980; Sebrier et al., 1988).

2.1.2. La Fractura de Mendaña, corresponde a una posible discontinuidad de la corteza oceánica que se localiza en el extremo NO de la región Central de Perú, frente al departamento de Ancash (10º-12º de latitud Sur). Esta fractura es perpendicular a la línea de la Fosa Peruano-Chilena con un ancho de 150Km y una orientación N62ºE. La fractura de Mendaña se encuentra aproximadamente a una distancia de 180Km de la línea de fosa.

2.1.3. La Fosa Perú-Chile, delimita el inicio de la subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana, está formada por sedimentos de diferente potencia depositados sobre rocas preexistentes. La fosa Peruano-Chilena alcanza profundidades máximas de hasta 6000 metros en la región Norte y Sur, en la región Centro es del orden de 5000 metros.

La orientación de la fosa es en dirección NNO-SSE en la región Norte y Centro de Perú, y NO-SE en la región Sur de Perú (Heras, 2002). El cambio en la orientación de la fosa se produce frente a la Dorsal de Nazca. La distancia entre la fosa y la línea de Costa en la región Norte es de 80km, en la región central varía entre 60 y 150km y en la región Sur es de 120km aproximadamente.

2.1.4. La Cordillera Andina, la Cordillera Andina se formó a finales del Cretácico tardío, por el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Esta cadena montañosa se extiende a lo largo del borde occidental de Sudamérica y tiene una extensión de 7500km aproximadamente con alturas máximas del orden de 6000msnm. En Perú de Norte a Sur la Cordillera de los Andes está bien definida y muestra dos deflexiones: Deflexión de Huancabamba, a la altura de 5º Sur y la Deflexión de Abancay, a la altura de 14º Sur, estas deflexiones cambian la orientación de la Cordillera Andina en dirección Noreste-Suroeste y Este-Oeste respectivamente. Desde el punto de vista geomorfológico la Cordillera Andina está constituida de una serie de unidades morfoestructurales que se distribuyen de Oeste a Este y que se ilustran en la Figura 2.1: La Zona Costera, la Cordillera Occidental, el Altiplano, la Cordillera Oriental y la Zona Subandina (Dalmayarac et al., 1988; Tavera y Buforn, 1998). Estas unidades son descritas a continuación:

Zona Costera, corresponde a una estrecha franja que se extiende a lo largo del litoral peruano, con elevaciones que varían entre 50 y 1500msnm y ancho entre 15 y 100km en las regiones Norte y Centro y aproximadamente 50 km en la región Sur. La zona Norte y Centro presenta suaves plegamientos de rocas volcánicas y sedimentarias, la región Sur se caracteriza por presentar fuertes plegamientos de rocas basálticas.

La Cordillera Occidental, es conocida también como el Batolito Andino de mayor volumen, con elevaciones máximas de 5000msnm. En general, esta unidad se orienta en dirección NO-SE; sin embargo cerca de la deflexión de Abancay, su orientación cambia hacia el Oeste y cerca de la deflexión de Huancabamba hacia el NE. Litológicamente esta unidad está compuesta por rocas volcánicas y plutónicas fuertemente plegadas con presencia de fallas normales e inversas. En la región Sur, la unidad se caracteriza por presentar una alineación de conos volcánicos sobre una longitud aproximada de 300km con dirección NO-SE.

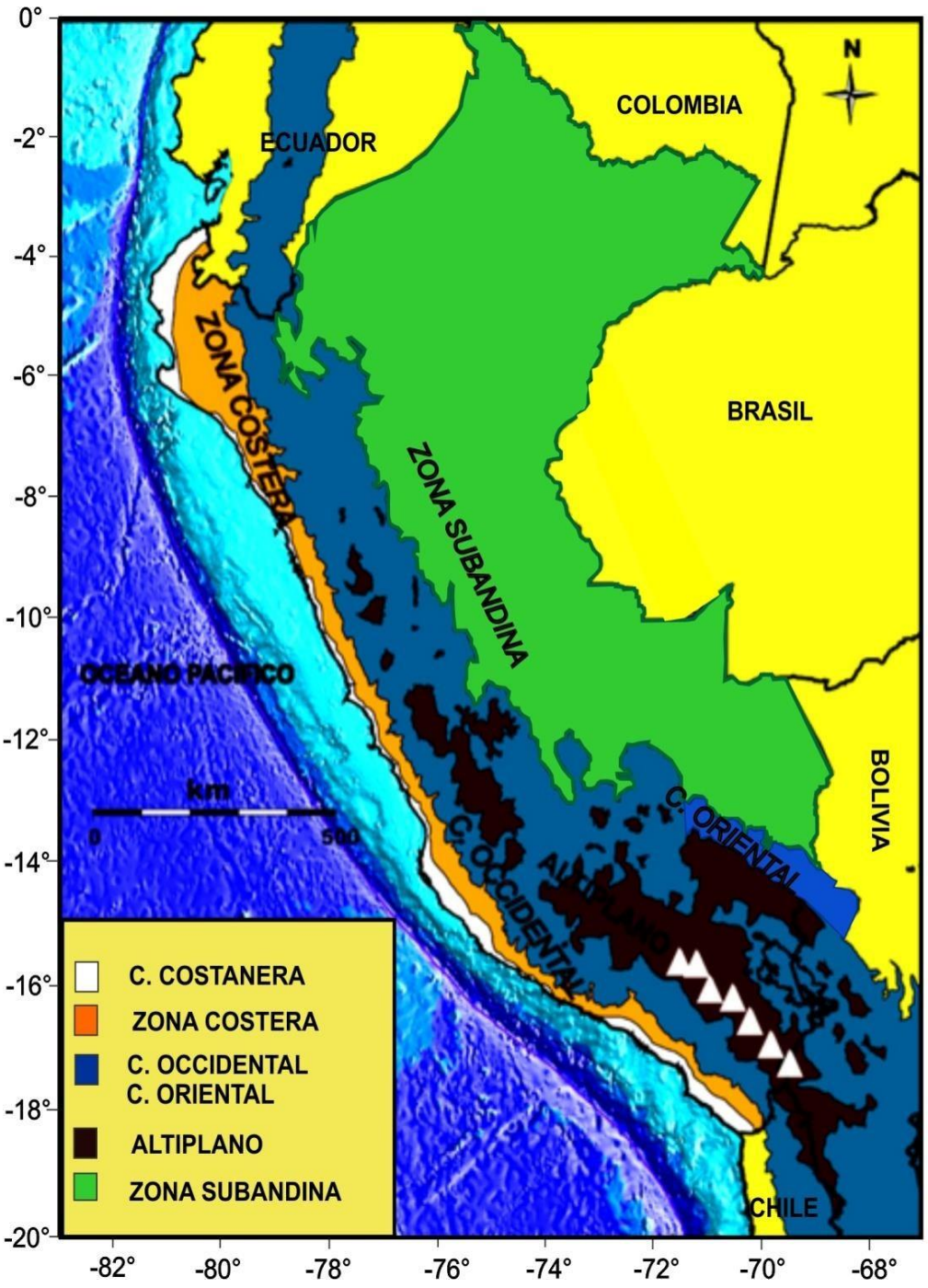


Figura 2.1. *Principales unidades geomorfológicas presentes en el Perú (Dalmayrac et al., 1988; Tavera y Buforn, 1998).*

El Altiplano, corresponde a una cuenca plana cerrada con una elevación media de 4000 msnm. En la región central presenta anchos que varían entre 10 y 50km, en la región Sur entre 140 y 200km para extenderse desde la latitud 9º Sur hasta cubrir todo el Altiplano peruano. Esta unidad está formada por una serie de depresiones intramontañosas y altas mesetas.

La Cordillera Oriental, morfológicamente corresponde a un extenso anticlinal formado por depósitos de tipo intrusivo, cuyo levantamiento fue controlado por una serie de fallas regionales. Esta cordillera se extiende de Norte a Sur siguiendo una orientación NO-SE, con elevaciones que varían entre 3700 a 4000msnm y anchos entre 70 a 100km aproximadamente. En la región Sur soporta un fuerte arqueamiento en dirección E-O a la altura de la deflexión de Abancay; mientras que en la región Norte, desaparece debido a la presencia de la deflexión de Huancabamba.

La Zona Subandina, zona de ancho variable donde se amortiguan las estructuras andinas. Está formada por una cobertura de sedimentos del Mesozoico y Cenozoico, formando una serie de terrenos fuertemente plegados como producto de la subsidencia del Escudo brasileño bajo la Cordillera Andina. Se caracteriza por presentar una topografía accidentada con la presencia de numerosos sistemas de fallas inversas, sobre-escurrimientos y plegamientos orientados en dirección NO-SE.

2.1.5. La Cadena Volcánica, se ubica en la región Sur del Perú por debajo de la deflexión de Abancay entre los 14º hasta los 25º Sur en Chile. Esta cadena se distribuye sobre la cordillera Occidental, siguiendo en el Perú un aparente alineamiento con orientación NO-SE. Las características geométricas de cada uno de los volcanes que integran esta cadena, muestran que la actividad tectónica es contemporánea a la orogenia extensional que experimenta la Cordillera Andina cerca del Cuaternario Medio y Reciente (Sebrier et al., 1985).

2.1.6. Sistemas de Fallas, son resultado del continuo proceso de deformación de la corteza continental como consecuencia del levantamiento de la Cordillera Andina, originado por la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana.

Las fallas se encuentran distribuidas sobre todo el territorio formando grupos con geometrías y procesos similares de deformación. En la alta Cordillera y Altiplano el número de estos sistemas de fallas es menor, mientras que, mayormente ellas están presentes en la zona subandina. A continuación se

describen las características de los principales sistemas de fallas según su ubicación:

Zona Costera, en esta zona, al Norte de 5º Sur se ubica la Falla de Huaypira con orientación NE-SO y E-O. Entre 14º y 16º Sur, se encuentra la Falla de Marcona ubicada al NE de San Juan de Marcona (Ica). A la altura de 16.5º S destaca la Falla de la Planchada en la provincia de Islay (Arequipa). Estas fallas presentan longitudes del orden de 90km en promedio y son de tipo normal.

Cordillera Oriental y Occidental, el importante proceso de levantamiento que ha soportado la Cordillera Andina, ha permitido la formación del sistema de Fallas de la Cordillera Blanca, siendo su ramal Norte conocido como Falla de Quiches. Ambas fallas presentan un buzamiento SO.

El sistema de Fallas de Huambo-Cabanaconde compuesto por fallas Trigal y Solarpampa, que se ubican en el extremo Norte del complejo volcánico Ampato-Sabancaya Hualca-Hualca entre las localidades de Huambo y Cabanaconde. Estas fallas son de tipo normal con rumbo en dirección E-O y buzamiento hacia el Sur con valores entre 60° y 70° (Sébrier et al., 1985) y presentan longitudes del orden de 10 a 12km aproximadamente.

La Falla de Ichupampa se ubica en el extremo NE del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, es de tipo normal con rumbo en dirección NO-SE y buzamiento hacia el Este. La longitud aproximada de esta falla es de 25km.

En la latitud -12.5º se ubica la Falla de Huaytapallana al pie del nevado de la Cordillera de Huaytapallana (Huancayo), presenta movimiento de tipo inverso en dirección NO-SE con buzamiento de 65º hacia el NE. Esta falla se reactivó con los sismos de 1969.

En la región Sur del Perú se encuentra el sistema de fallas de Tambomachay ubicada entre 13º y 14.5º Sur, al Norte de la ciudad del Cusco, está compuesta por las fallas de Tambomachay, Tamboray, Koricocha y Cusco.

En la Zona Subandina destacan los sistemas de Rioja, Satipo y Madre de Dios con longitudes de 300-500km y en general, se orientan paralelas a la Cordillera Andina con buzamiento hacia el SO. En la Figura 2.2 se presenta el mapa de ubicación de los principales sistemas de fallas (Macharé et al., 2003).

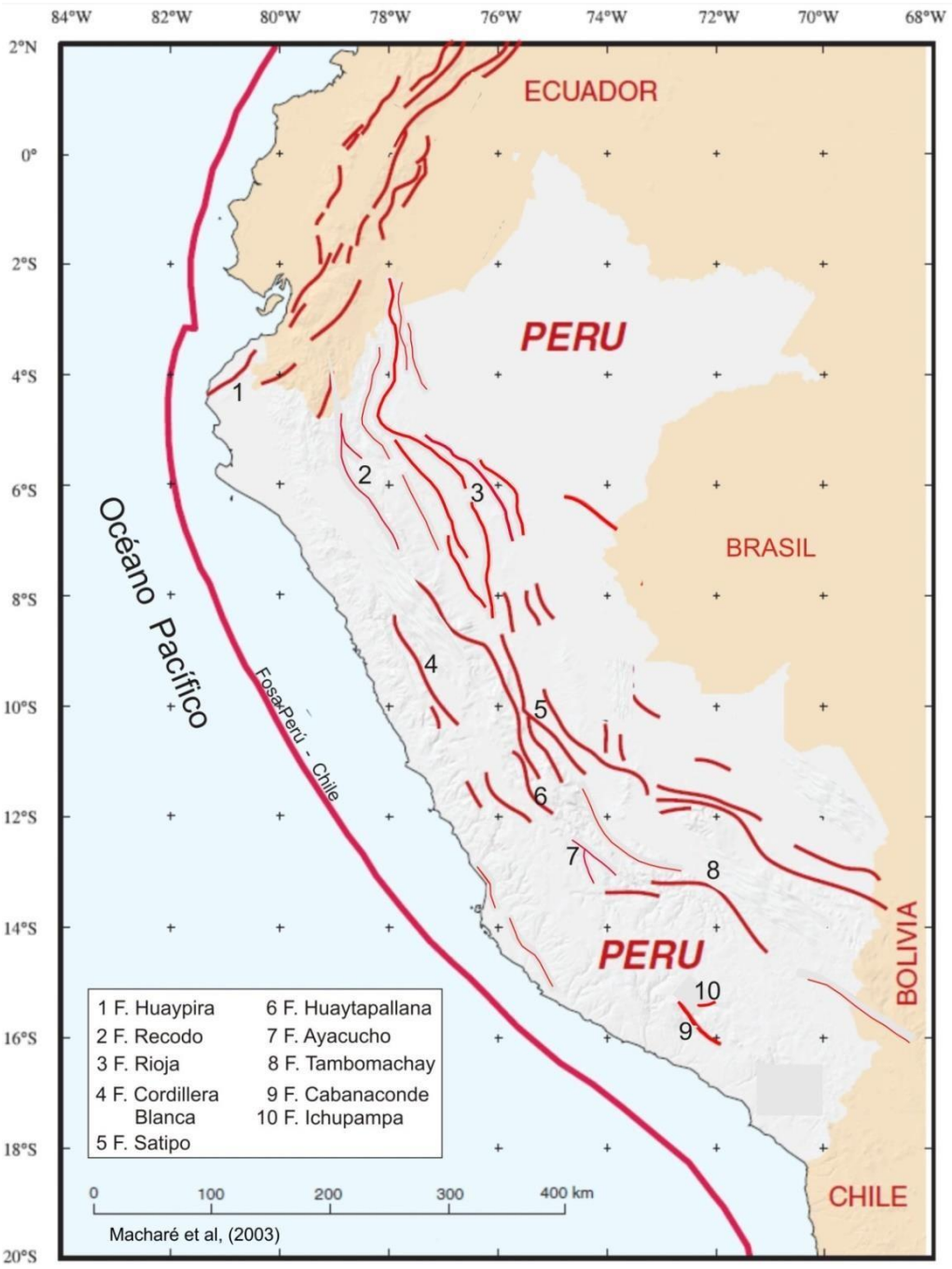


Figura 2.2. *Mapa de ubicación de los principales sistemas de fallas del Perú (Macharé et al., 2003).*

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA SISMICIDAD EN PERÚ

3.1. SISMICIDAD HISTÓRICA

La información acerca de terremotos en Perú data desde la época de la conquista española y mucha de ella es incompleta debido a diversas razones, como la escasa densidad poblacional. La información proviene de relatos y escritos en diversas obras inéditas, crónicas religiosas o en las narraciones de viajeros ilustres.

El historiador José Toribio Polo (1904), estimó que se habían producido más de 2500 temblores en territorio peruano desde la conquista hasta fines del siglo XIX y advirtió que por varias causas no se anotaron muchos sismos durante el periodo de 1600 a 1700. En ese periodo varias ciudades del Perú fueron destruidas por sismos, Arequipa en el año 1582, 1600 y 1784; Cusco en 1650; Trujillo en 1619 y 1725. En la región Central sobresalen los sismos ocurridos en 1586, primer gran sismo para el cual se tiene documentación histórica; 1687 y 1746, los mismos que destruyeron casi completamente a la ciudad de Lima siendo la cantidad de pérdidas humanas inmensa (Silgado, 1978). Los daños materiales fueron cuantiosos debido a que las construcciones eran inadecuadas, se construían con adobe y quincha en la costa y con piedra en las regiones altas. Durante el siglo XIX sucedieron varios sismos, uno de los principales por su intensidad, fue el de 1868 que devastó Arequipa, Tacna y Arica, para luego ser seguido por un tsunami que afectó a todo el Océano Pacífico llegando a playas de Japón, Nueva Zelanda y Australia.

Según Silgado (1978), en el presente siglo fueron notables los sismos ocurridos en Piura-Huancabamba (1912), Caravelí (1913), Chachapoyas (1928), Lima (1940), Nazca (1942), Quiches-Ancash (1946), Satipo (1947), Cusco (1950), Tumbes (1953), Arequipa (1958-1960), Lima (1966), Chimbote-Callejón de Huaylas (1970) y Lima (1974).

3.2. SISMICIDAD INSTRUMENTAL

Los registros de sismicidad instrumental datan del año 1960, año en que se inicia la instalación de la Red Sísmica Mundial. Esta base de datos permitió realizar los primeros análisis y evaluaciones de la sismicidad en Perú a fin de identificar las principales fuentes sismogénicas. Los estudios realizados por: Stauder (1975), Barazangui y Isacks (1976), Hasegawa y Isacks (1981) Grange (1984), Schneider y Sacks (1987), Rodríguez y Tavera (1991) Cahill y Isacks (1992), Lindo (1993), Tavera y Buforn (1998), Bernal (2002), han permitido configurar la geometría de la Placa de Nazca e identificar las zonas de mayor deformación cortical.

Los últimos estudios realizados por Tavera y Buforn (2001), Bernal et al, (2001) y Tavera y Bernal (2009), usando datos telesísmicos para el periodo 1964-1996 con mb $\geq$ 5.0, concluyen que la distribución espacial de los sismos en el Perú es compleja; no obstante, se pueden identificar áreas de sismicidad constituidas por importantes fuentes sismogénicas. En el borde Occidental del Perú durante el periodo de 1960-2010 han ocurrido siete terremotos de magnitudes elevadas en las regiones Centro y Sur (Figura 3.1).

- En 1966 se produce un terremoto con magnitud de 7.5Mw, con epicentro en la zona central del Perú. Las intensidades máximas evaluadas en la escala de Mercalli Modificada (MM) fueron de VIII en la ciudad de Huacho y VII en la ciudad de Lima.

- El 31 de mayo de 1970 ocurre un sismo con epicentro frente a la costa del departamento de Ancash. La magnitud del sismo fue de 7.8Mw, siendo uno

de los más destructores, perecieron 67000 personas y 150000 heridos (Ericksen et al., 1970). El terremoto provocó un alud como consecuencia del desprendimiento de una parte del nevado Huascarán y sepultó las localidades de Yungay y Ranrahirca. La máxima intensidad fue de IX (MM).

- El 3 de octubre de 1974 ocurre un terremoto de magnitud 7.5Mw con epicentro a 80km al oeste de Lima, causando severos daños en Lima y localidades cercanas con intensidades máximas de IX (MM) en algunos lugares de Lima. En los distritos al sur de Lima la intensidad máxima fue de VIII (MM). El sismo produjo un tsunami local con olas de 3 metros de altura.

- El 21 de febrero de 1996 ocurrió un sismo con epicentro frente a la ciudad de Chimbote. El sismo provocó un tsunami que causó daños materiales en el puerto de Chimbote y en la zona de desembocadura del río Santa, y perecieron 15 personas. El sismo produjo en dicha localidad, intensidades máximas de IV (MM) y su magnitud fue de 7.0Mw.

- El 12 de noviembre de 1996 ocurre un sismo con epicentro a 98km al SO de Nazca, perecieron 17 personas, se registraron 1500 heridos y 100000 damnificados. El sismo tuvo una máxima intensidad de VII (MM) y una magnitud de 7.7Mw.

- El 23 de junio del 2001, ocurrió un sismo que afectó todo el Sur del Perú. El terremoto produjo un tsunami con olas de 7-8m de altura. La máxima intensidad evaluada fue de VIII (MM) y su magnitud de 8.2Mw. Este sismo será descrito con detalle en capítulos posteriores.

- El 15 de agosto del 2007, se produjo un sismo de magnitud 7.9Mw, afectó la región central del Perú. Las intensidades máximas evaluadas fueron VII-VIII (MM) en las ciudades de Pisco, Ica y Chincha. El sismo produjo daños importantes en un gran número de viviendas en la ciudad de Pisco.

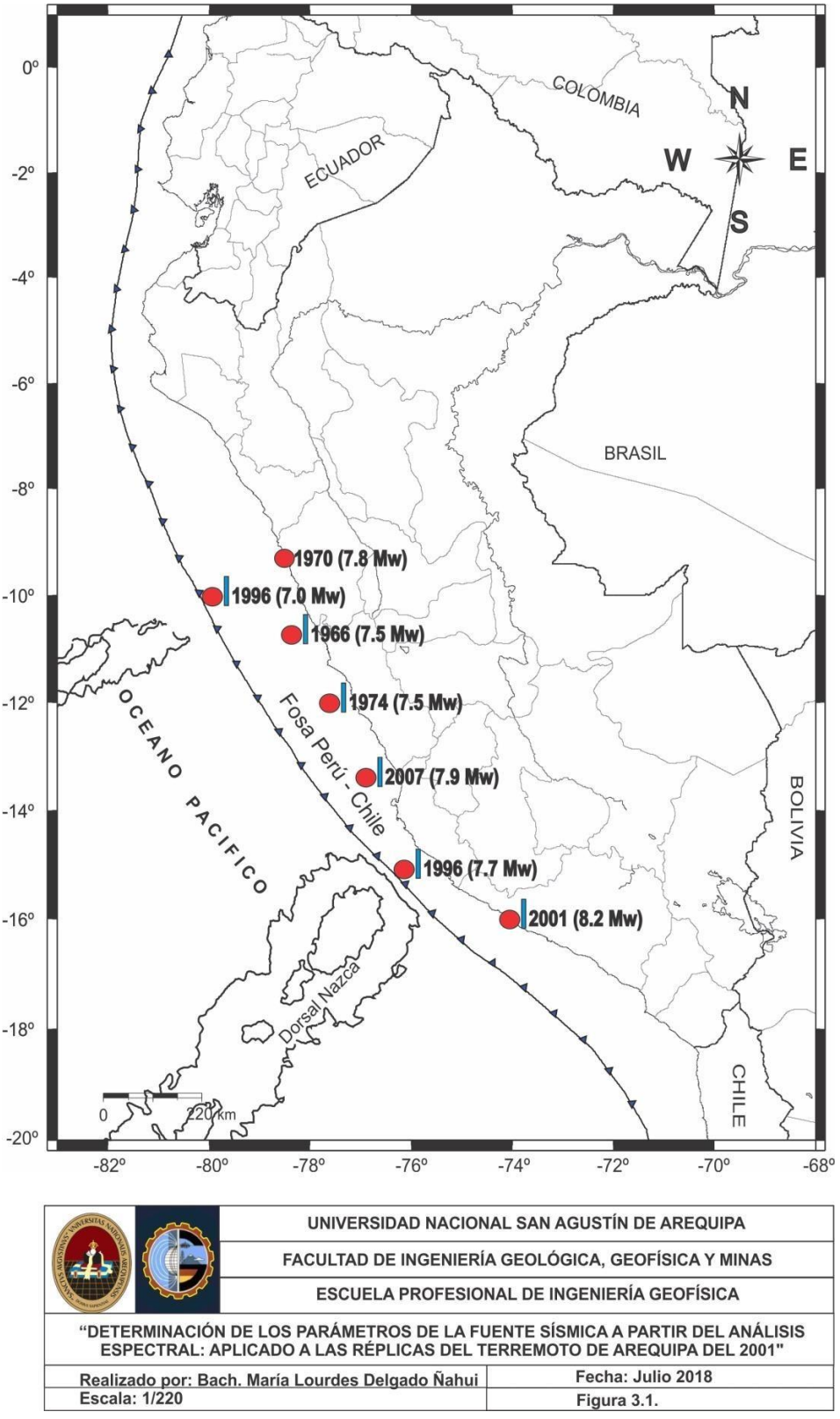


Figura 3.1. *Distribución espacial de grandes terremotos ocurridos en el borde occidental del Perú, periodo instrumental (1960-2010). Las barras de color azul indican los sismos que produjeron tsunami.*

3.3. PRINCIPALES SISMOS DESTRUCTORES EN EL SUR DEL PERÚ

A continuación se describen las principales características de los sismos más importantes ocurridos en la región Sur del Perú.

- **Sismo del 22/01/1582**

  La ciudad de Arequipa quedó en ruinas. Cayeron alrededor de 300 casas y perecieron más de 35 personas, muchas de ellas sepultadas entre los escombros. En el valle de Vitor y en toda la comarca hubo destrozos. La máxima intensidad del sismo fue de X (MM) y su magnitud de 7.5Ms.

- **Sismo del 24/11/1604**

  Un gran sismo y tsunami en la costa Sur. Las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna y Arica quedaron en ruinas, extendiéndose los daños hasta Ica, perecieron más de 23 personas. El sismo tuvo una intensidad máxima de IX (MM) y una magnitud 7.0Ms.

- **Sismo del 13/05/1784**

  La ciudad de Arequipa sufrió la ruina de edificios y viviendas, se deterioró el empedrado de sus calles. Este sismo afectó las poblaciones situadas en un radio de 100km. Perecieron 54 personas. La máxima intensidad del sismo fue de X (MM) y su magnitud fue de 7.8Ms.

- **Sismo del 10/07/1821**

  El sismo ocasiona grandes daños en los pueblos de Camaná, Ocoña, Caravelí, Chuquibamba y Valle de Majes, perecieron 162 personas. La máxima intensidad del sismo fue de VIII (MM) y su magnitud fue de 7.9Ms.

- **Sismo del 13/08/1868**

  El sismo causó destrucción en Arequipa, Tacna, Moquegua, Arica e Iquique. El tsunami que siguió al sismo presentó olas de 16m de altura. Perecieron aproximadamente 180 personas en todo el Sur. La máxima intensidad del sismo fue de X (MM) y su magnitud fue de 8.6Ms.

- **Sismo del 24/08/1942**

  Sismo que destruyó los alrededores de Ica y Arequipa. Se produjo un tsunami con olas que alcanzaron 3 metros de altura. Perecieron 30 personas y 25 heridos por diversas causas. La máxima intensidad evaluada de este sismo fue de IX (MM) y su magnitud fue de 6.7Ms.

- **Sismo del 15/01/1958**

  Sismo en Arequipa, provocó la muerte de 28 personas y 133 heridos. Silgado indicó agrietamiento del terreno cerca de la zona de Camaná, con eyección de aguas negras. La máxima intensidad del sismo fue de VIII (MM) y su magnitud fue de 7.0Ms.

- **Sismo del 13/01/1960**

  El sismo afectó la región sur del Perú, principalmente la ciudad de Arequipa y las provincias de Caravelí, Cotahuasi y otras de Moquegua como Omate y Puquina. La máxima intensidad evaluada fue de VIII (MM) en las ciudades de Arequipa y Chuquibamba, su magnitud fue de 7.5Ms. El sismo fue sensible a la población en un radio de 500km para una intensidad de III-IV (MM).

- **Sismo del 16/02/1979**

  El sismo afectó el extremo Oeste del departamento de Arequipa. Produjo severos daños en las localidades de Chuquibamba y pueblos del Valle de Majes, se contabilizó 215 heridos. El sismo tuvo una magnitud de 6.8 Ms e intensidades máximas de VII (MM) en la ciudad de Camaná, con radio de percepción de 250km para una intensidad de IV-V (MM).

- **Sismo del 23/06/2001**

  Este sismo afectó todo el sur del Perú, perecieron 64 personas y más de 217400 personas sufrieron los efectos. El sismo fue seguido por un tsunami con olas de 7-8 metros de altura registradas en la ciudad de Camaná, departamento de Arequipa. La magnitud del sismo fue de 8.2Mw

y la máxima intensidad evaluada VIII (MM).

3.4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS SISMOS

Para identificar las principales fuentes sismogénicas presentes en el Perú, se debe realizar el análisis de la distribución espacial de los sismos en superficie a partir de mapas de sismicidad elaborados para tres rangos de profundidad:

- Sismos con foco superficial ($h \leq 60$km),
- Sismos con foco intermedio ($60 < h \leq 300$km)
- Sismos con foco profundo ($h > 301$km).

A) Sismicidad con foco superficial

Este tipo de sismicidad se localiza entre la fosa y la línea de costa marcando el límite entre la placa oceánica (Nazca) y la continental (Sudamericana), se caracteriza por generar sismos de magnitudes elevadas, como el ocurrido el 23 de Junio del 2001 (8.2 Mw). Otro grupo importante de sismicidad es producido por las deformaciones superficiales de la placa en el interior del continente y se distribuye paralela a la Cordillera Andina. La mayoría de los sismos se localizan entre la Cordillera Oriental y el margen Oeste de la zona Subandina, los sismos que ocurren en estas regiones presentan magnitudes moderadas y son menos frecuentes. En la Figura 3.2 se presenta el mapa sísmico del Perú, para el periodo 1960-2017, el tamaño de los círculos indica la magnitud del sismo y los círculos con número inscrito, indican el año de ocurrencia de grandes sismos, como por ejemplo el sismo de Arequipa del 23 de junio del 2001. El mapa sísmico se encuentra disponible en la página web del Instituto Geofísico del Perú.

B) Sismicidad con foco intermedio

Se distribuye de forma irregular en el interior del continente, siendo posible considerar tres grupos: El primer grupo, paralelo a la línea de costa desde 9º a 19ºS y se caracteriza por presentar magnitudes variadas.

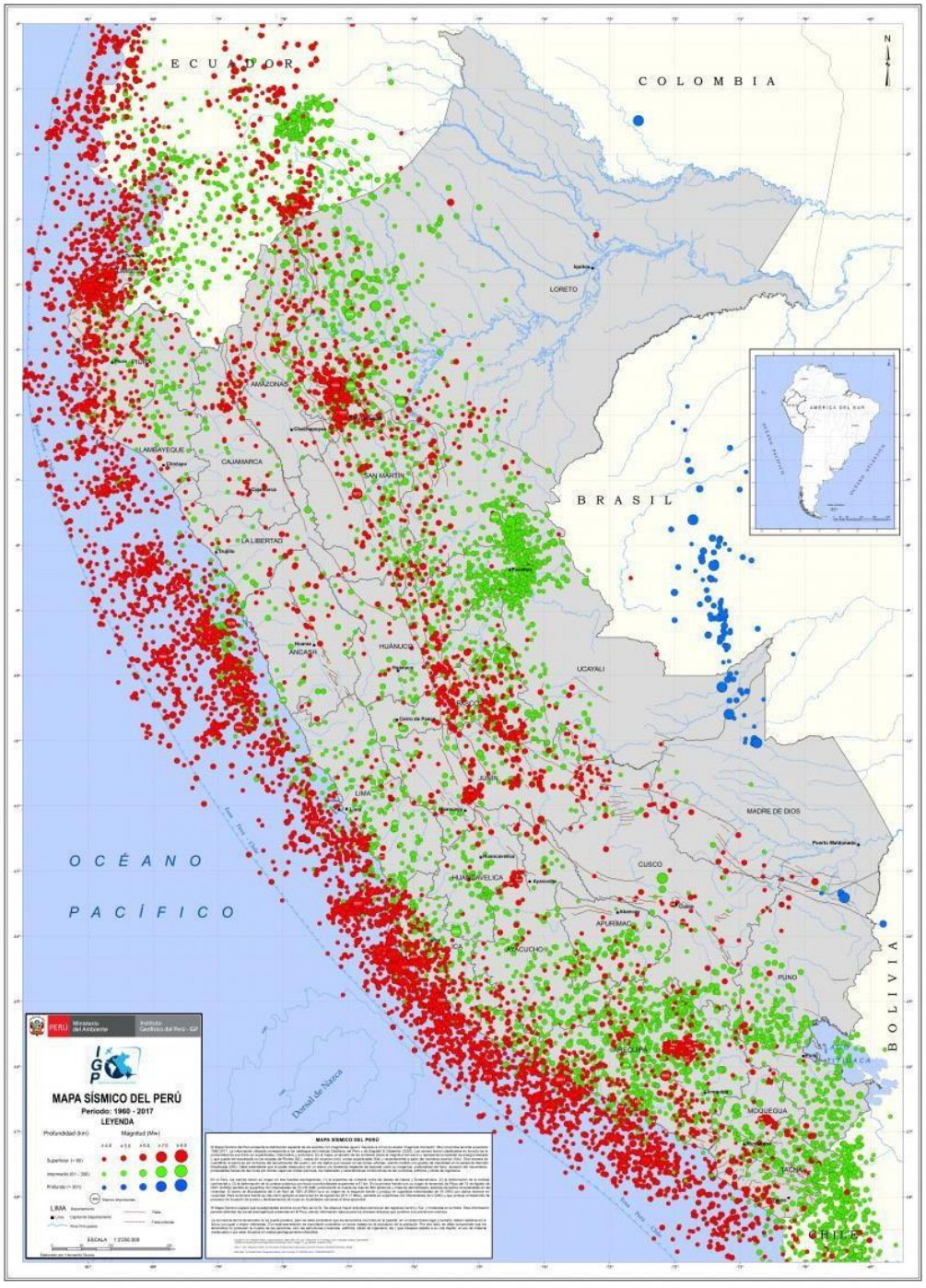


Figura 3.2. *Mapa sísmico de Perú para el periodo 1960-2017. Fuente Instituto Geofísico del Perú.*

El segundo grupo se localiza en el interior del continente paralelo a la Cordillera Oriental y Zona Subandina, donde los sismos alcanzan profundidades de 100-150km y generalmente, no son percibidos por la población. El tercer grupo considera los sismos que se distribuyen sobre

toda la región Sur de Perú y se caracteriza por presentar un mayor número de sismos a una distancia de 500km de longitud desde la fosa Perú-Chile, alcanzan profundidades de 300km aproximadamente.

C) Sismicidad con foco profundo

Este tipo de sismicidad se localiza en la región centro y sur de la Llanura Amazónica, es mayor en la proximidad de la frontera Perú-Brasil (6º-11ºS) con epicentros que se alinean en dirección Norte-Sur, a lo largo de 500km de longitud. En la frontera Perú-Bolivia, los sismos son más dispersos y sus epicentros se orientan en dirección E-O. El sismo de foco profundo del 9 de Junio de 1994 (8.5Mw) fue el más importante ocurrido en los últimos cien años.

3.5. ESQUEMA SISMOTECTÓNICO DEL PERÚ

La información probable de la distribución de los sismos en función de la profundidad de sus focos, ha permitido desarrollar diversos modelos para la geometría del proceso de subducción en el borde occidental de Perú. Las características de la sismicidad en Perú han sido estudiadas por varios autores: Stauder (1975), Barazangui y Isacks (1976), Hasegawa y Sacks (1981), Grange et al (1984), Schneider y Sacks (1987), Rodríguez y Tavera (1991), Cachill y Isacks (1992), Lindo (1993), Tavera (1998) y Tavera y Buforn (2001), todos estos estudios concluyen que en el Perú se presentan dos tipos de subducción: Una subducción subhorizontal en la región Norte y Centro (Figura 3.3.a.), donde la placa de Nazca subduce con un ángulo de 10º hasta una profundidad de 100km aproximadamente, a partir de la cual se hace prácticamente horizontal hasta una distancia de 700-750km desde la fosa. La segunda, es una subducción normal, presente en la región Sur (Figura 3.3.b.), y en donde se originó el sismo de Arequipa del 23 de junio del 2001, este tipo de subducción se inicia con un ángulo de 25º a 30º hasta alcanzar una profundidad de 300-350km, distancia horizontal de 550km desde la fosa.

En la región Sur, el tipo de subducción está asociada a un arco volcánico que se ubica hacia el interior del continente y que tiene su origen en la ascensión

del magma desde la placa subducente, que produce el engrosamiento de la corteza y el plegamiento de los sedimentos hasta formar una franja de cadenas montañosas con volcanismo activo paralelo al margen de la placa.

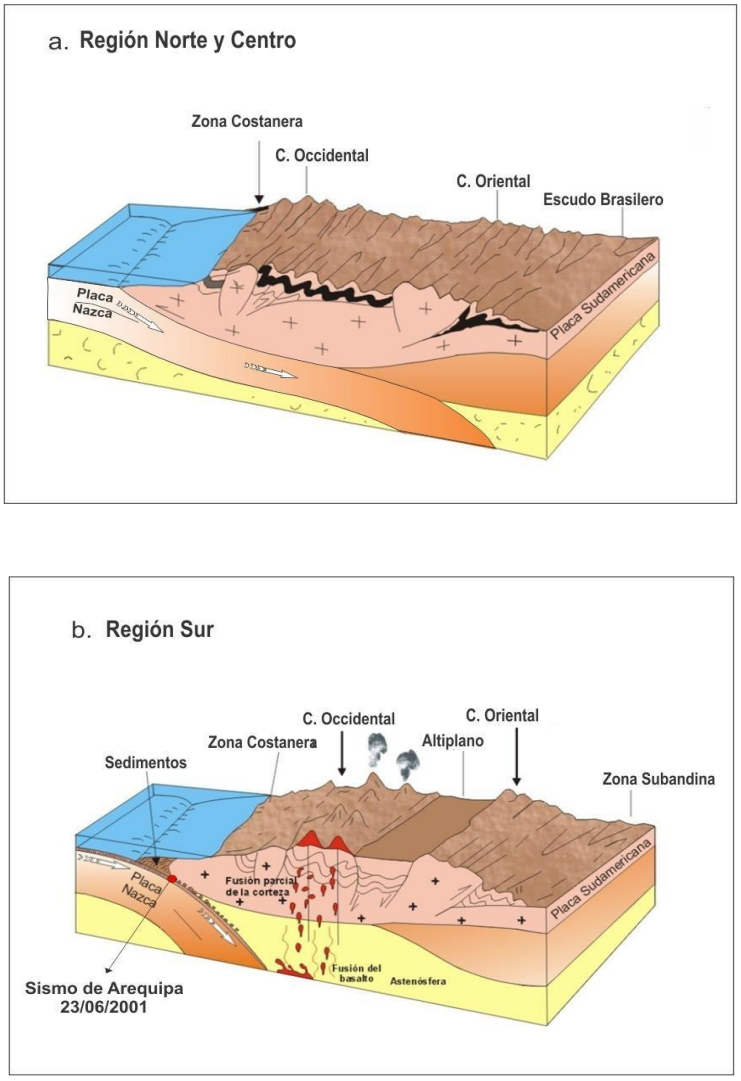


Figura 3.3. *Esquema sismotectónico del Perú. a) Subducción subhorizontal en el Norte y Centro del Perú b) Subducción normal en el Sur del Perú. El círculo rojo representa el sismo de Arequipa del 2001 (Mattauer, 1989).*

CAPÍTULO IV

TERREMOTO DEL 23 DE JUNIO DEL 2001

El sábado 23 de junio del 2001 a las 15 horas con 33 minutos y 14.2 segundos (Hora local) ocurrió en la zona Sur del Perú un terremoto de elevada magnitud (Mw=8.2) con epicentro a 82km al NO del distrito de Ocoña, provincia de Camaná en el departamento de Arequipa.

Más de 80 poblados resultaron severamente dañados en los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna (Perú), así como Arica e Iquique en Chile. En total 217400 personas sufrieron los efectos del terremoto, más de 35000 casas fueron dañadas y 17580 totalmente destruidas. El terremoto fue seguido por un tsunami local con alturas de ola de 8 a 10m en la localidad de Camaná, en donde perecieron 64 personas y 24 desaparecieron.

Este terremoto tuvo su origen en la convergencia de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Este proceso de convergencia ha causado los terremotos de mayor magnitud en las regiones centro y sur del Perú en los años 1746, 1868, 1940, 1942, 1966, 1974 y 1996. La región sur del Perú frecuentemente es sacudida por terremotos de importante magnitud y cuyos epicentros se localizan entre la Fosa Perú-Chile y la línea de costa, varios de ellos también han generado tsunami.

4.1. PARÁMETROS DEL HIPOCENTRO Y RÉPLICAS

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizó la localización del epicentro del terremoto del 23 de junio del 2001, en las coordenadas 16.31ºS y 73.82ºO, a

82km al NO de la localidad de Ocoña y foco a una profundidad focal de 29km. Este evento se caracterizó por su gran duración, puesta de manifiesto en la complejidad de su registro que inicialmente podría evidenciar un proceso de ruptura muy heterogéneo, así como el modo de propagación de la energía que produjo el ondulamiento de la superficie y la generación de un tsunami de carácter netamente local. Este sismo produjo en las primeras veinticuatro horas 134 réplicas ($ML \geq 3$), todas con sus epicentros ubicados al SE del epicentro del evento principal, lo cual sugiere la propagación de la ruptura en esa dirección.

4.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE RÉPLICAS

El mapa de intensidades del terremoto de Arequipa (Figura 4.1) ha sido elaborado usando información de más de 60 ciudades e interpretada usando la Escala de Mercalli Modificada (MM).

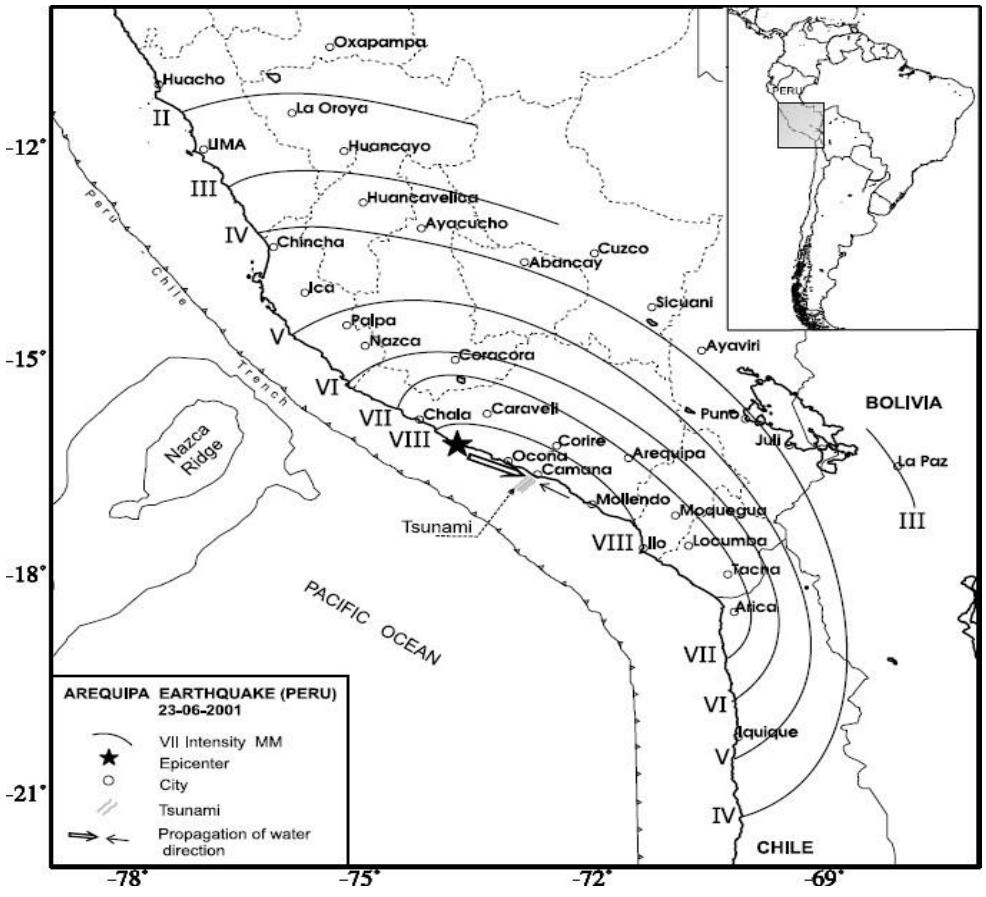


Figura 4.1. *Mapa de isosistas del terremoto de Arequipa (Tavera et al., 2002).*

Las isosistas muestran una distribución elíptica. La máxima intensidad evaluada fue de VIII (MM) en las localidades de Ocoña, Camaná y Mollendo. La isosista IV tiene el mayor eje (1150km) orientado en dirección NO-SE paralela a la línea de costa. En la ciudad de Arequipa muchas iglesias y monumentos históricos fueron dañados. En los departamentos de Moquegua y Tacna el mayor daño corresponde a las edificaciones antiguas de adobe y quincha, en distritos que han ocupado zonas con suelos con características geotécnicas inestables.

En la carretera Panamericana Sur aparecieron varias grietas con orientación paralela a la línea de costa y ocurrieron varios deslizamientos. En continente el sismo fue sentido en Cusco (Perú) y en La Paz (Bolivia), evaluándose intensidades de III (MM) para ambas ciudades. Asimismo, la DIREMER Región I de Chile informó que el terremoto de Arequipa produjo en la ciudad de Arica intensidades del orden de VII, en Iquique de VI y en Calama de IV-V en la escala Mercalli Modificada.

Los parámetros hipocentrales del evento sísmico del 23 de Junio y sus 220 réplicas han sido relocalizadas con información de la Red Sísmica Nacional del Perú y de 8 estaciones instaladas después de ocurrido el sismo, siendo todos los registros de estaciones de banda ancha de tres componentes. La relocalización de réplicas se realizó teniendo como mínimo 4 estaciones de registro y el algoritmo Hypoinverse (Klein, 1978), se usó el modelo de velocidad de Lindo et al. (1993) y la relación Vp/Vs=1.78 calculado con casi 800 réplicas.

La Figura 4.2 muestra la distribución espacial de 220 réplicas que definen un área rectangular de 300x120km^2 entre la fosa y la línea de costa. Al considerar la geometría de la localización del evento principal y las réplicas, es evidente que el proceso de ruptura se propagó en forma heterogénea y en dirección SE del distrito de Ocoña, en el departamento de Arequipa hasta Ilo en Moquegua. En contraste, la distribución de réplicas indica que el proceso de ruptura se habría detenido abruptamente frente a la localidad de Ilo con la

ocurrencia de dos réplicas de gran magnitud (Mw=6.6 y 7.5), definiendo la presencia de una importante barrera.

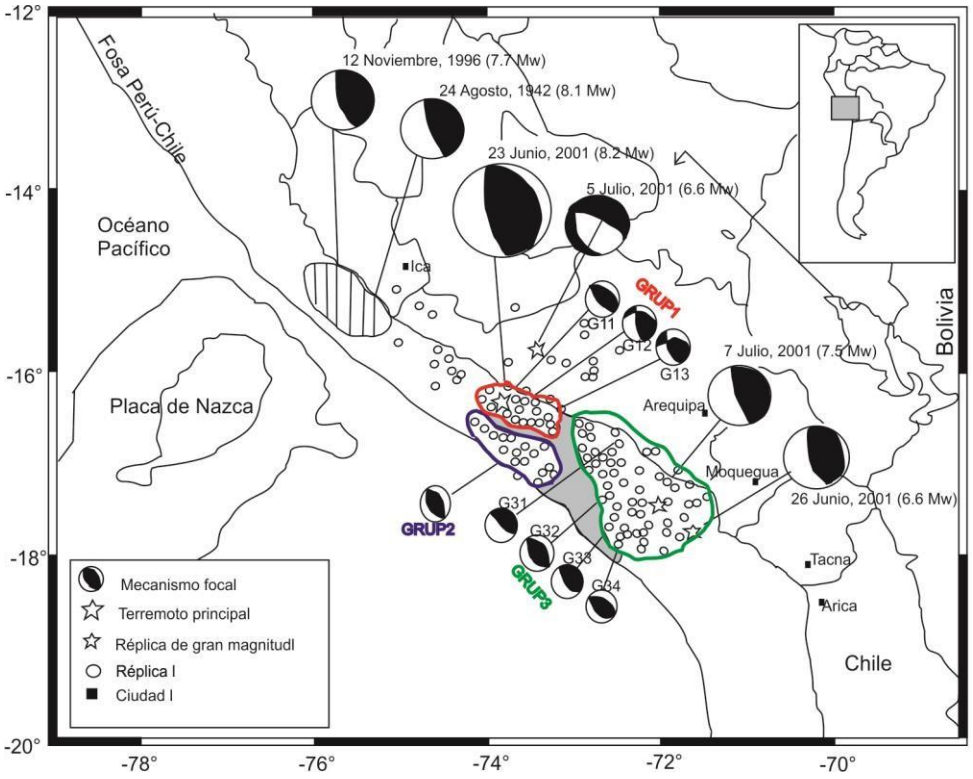


Figura 4.2. *Distribución espacial del epicentro del evento principal y réplicas relocalizadas del terremoto del 23 de Junio del 2001. Los mecanismos focales fueron obtenidos usando registros telesísmicos. El área rayada corresponde a las réplicas del terremoto de Noviembre de 1996 (Tavera et al., 1998) y la sombreada, al área que no ha experimentado ruptura durante el terremoto del 23 de Junio. Los grupos de réplicas están delimitados por líneas punteadas. La fecha y magnitud están ubicadas encima de cada mecanismo focal (Redibujado de Tavera et al., 2006).*

El total de réplicas son distribuidas formando 3 grupos: Uno alrededor del epicentro del evento principal (Grupo1), otro cerca de la fosa (Grupo2) y el tercero en dirección SE entre las localidades de Camaná e Ilo (Grupo3). De estos grupos, el Grupo1 presenta mayor número de réplicas, todas concentradas alrededor del epicentro del terremoto principal.

En general, entre los grupos de réplicas se tiene la presencia de un área que no habría experimentado ruptura durante el terremoto, y esto podría considerarse como una aspereza o el desplazamiento de las placas habría sido

producido en un medio asísmico (Área sombreada de la Figura 4.2). Ambas hipótesis son válidas cuando se considera que el terremoto del 23 de Junio del 2001 tuvo un proceso de ruptura complejo a través de una superficie muy heterogénea (Tavera et al., 2006).

4.3. ORIENTACIÓN DE LA RUPTURA

La orientación de los procesos de ruptura del evento principal y las réplicas de mayor magnitud (Figura 4.3) fueron obtenidas por Tavera et al. (2006) a partir de las características de la polaridad de la onda P, siendo los mecanismos focales de tipo inverso y con planos nodales orientados en dirección NO-SE y un posible plano de falla casi horizontal.

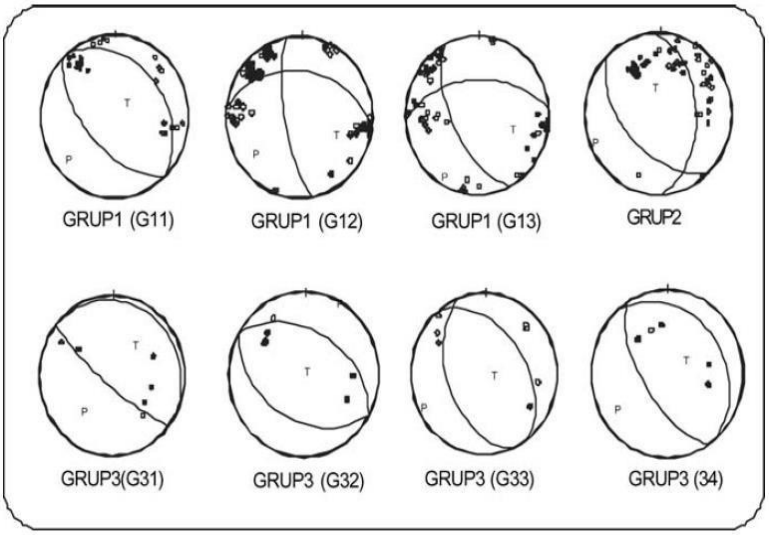


Figura 4.3. *Mecanismos focales simples y compuestos elaborados a partir de la polaridad de la onda P para los tres grupos de réplicas mostradas en la Figura 4.2. P y T corresponden a los ejes de presión y tensión (Tavera et al., 2006).*

Las soluciones son coherentes con el patrón de deformación regional como resultado del proceso de convergencia de las placas.

De acuerdo con el reagrupamiento de réplicas descritas en la Figura 4.3, el Grupo1 ha sido dividido en 3 subgrupos (G1, G2 y G3) y para cada uno de ellos se elaboró un mecanismo focal, siendo todos del tipo inverso con planos

nodales orientados hacia la misma dirección del evento principal, sin embargo los grupos G12 y G13 tienen una pequeña componente rumbo-buzamiento.
En general el patrón de deformación sobre toda el área de réplicas fue aproximadamente el mismo (Tavera et al., 2002).
El mecanismo focal del terremoto principal y de tres réplicas también fueron evaluadas a partir del modelado de las amplitudes y formas de la onda P registradas en estaciones sísmicas localizadas a distancias telesísmicas (30°<d< 90°). Tavera et al. (2002) hace uso de la metodología propuesta por Nabeleck (1984) con la finalidad de cuantificar la orientación de la fuente (mecanismo focal), la profundidad del foco (h), la función temporal de la fuente sísmica (STF) y el momento sísmico escalar (Mo). Mediante un proceso iterativo se hace mínima la desviación estándar de los residuos de la correlación existente entre los registros observados y teóricos, siendo este evaluado a partir de la "raíz media cuadrática (RMS)" del ajuste.

4.3.1. Sismo Principal

En la Figura 4.4 se representa el modelado de la amplitud y forma de las ondas P para obtener el mecanismo focal del sismo principal. Los resultados sugieren que el terremoto de Arequipa corresponde a una fuente de tipo inverso y plano de falla orientado en dirección NO-SE casi horizontal.

De acuerdo con la RMS más baja, el proceso de ruptura del sismo principal comenzó a 29km de profundidad y se propagó en dirección N135º a través de una superficie inclinada en 28º NE y con una velocidad de 2km/segundo.

La orientación e inclinación del plano de ruptura es coherente con la geometría del área de réplicas y con la superficie de fricción de las placas; sin embargo, la velocidad de ruptura es muy baja, esto podría explicar la gran duración del terremoto y su complejidad (Tavera et al., 2002).

El momento sísmico para el sismo principal es de $1.3x10^{21}$N.m equivalente a una magnitud de 8.1Mw.

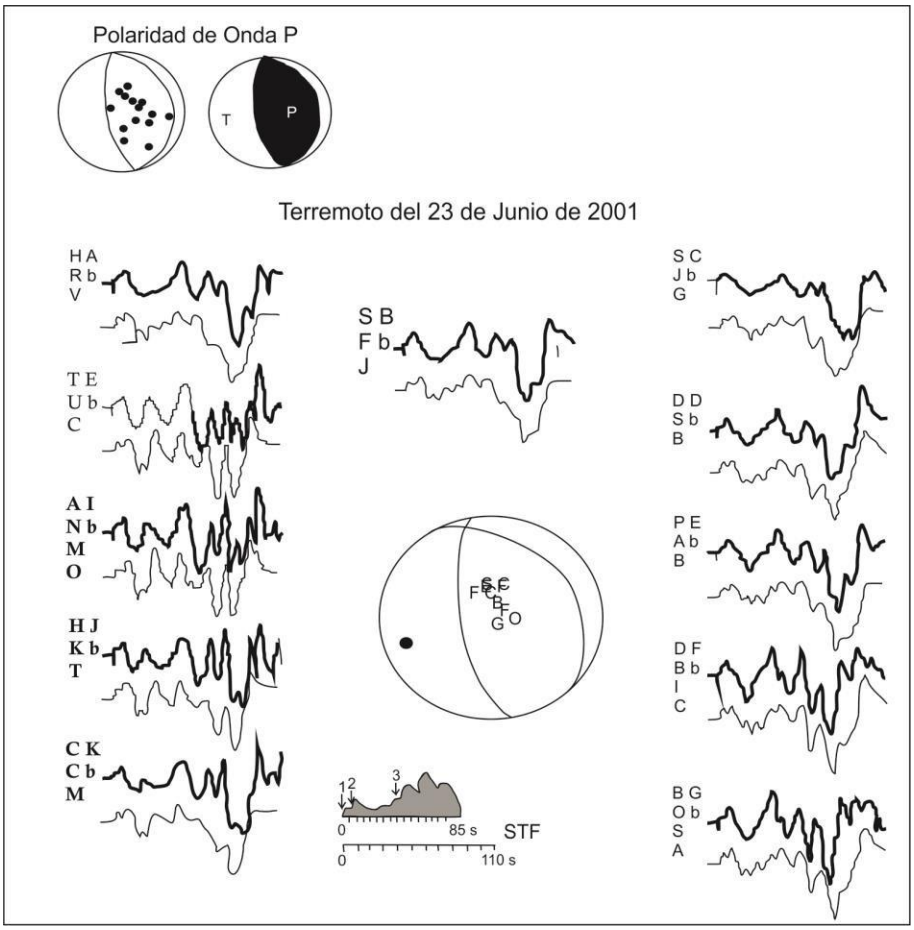


Figura 4.4. *Formas de onda, observadas y sintéticas correspondientes al terremoto. El código de la estación está en el extremo izquierdo del registro, la distancia epicentral. La esfera focal corresponde a su proyección en el hemisferio inferior, siendo P y T ejes representados por círculos negros y blancos. La STF es presentada bajo el mecanismo focal. En la parte superior, el mecanismo focal corresponde a dos eventos sísmicos (E1, E2), así como la solución a partir de la polaridad de la onda P (Redibujado de Tavera, 2002).*

4.3.2. Réplica del 26 de Junio

El epicentro de la réplica del 26 de Junio se ubicó a 36km hacia el Oeste de la localidad de Ilo, donde la intensidad máxima evaluada fue de V (MM). La solución del mecanismo focal tiene tendencia similar a la del sismo principal, con un plano de falla buzando 21º al este como se presenta en la Figura 4.5.a. La profundidad focal se ajustó a 32km.

La STF es simple con una duración de aproximadamente 5 segundos y un momento sísmico de $1.19x10^{19}$N.m equivalente a una magnitud de 6.6Mw.

En la Figura 4.5 se tiene la solución del mecanismo focal de las réplicas del 26 de Junio, 5 de Julio y del 7 de Julio.

4.3.3. Réplica del 5 de Julio

La réplica del 5 de Julio tuvo su epicentro a 79km en dirección NE con respecto al evento principal, se evaluaron intensidades máximas de V (MM) en las localidades de Atico, Ocoña y Caravelí en Arequipa.

La solución corresponde a un mecanismo de tipo normal con planos nodales con tendencia al NO-SE, y un posible plano de falla buzando al NE (Figura 4.5.b). La profundidad focal fue ajustada a 75km y momento sísmico de $1.1x10^{19}$N.m equivalente a una magnitud de 6.6Mw.

4.3.4. Réplica del 7 de Julio

El epicentro de la réplica del 7 de Julio se localizó a 54km al SO de la ciudad de Mollendo donde se evaluaron intensidades de V (MM).

La solución corresponde a un mecanismo de tipo inverso con la misma orientación que el evento principal (Figura 4.5.c).

La STF de esta réplica muestra una duración de 27 segundos y la profundidad focal ajustada a 18km, con un momento sísmico de $3.4x10^{20}$N.m que equivale a la magnitud de 7.6Mw.

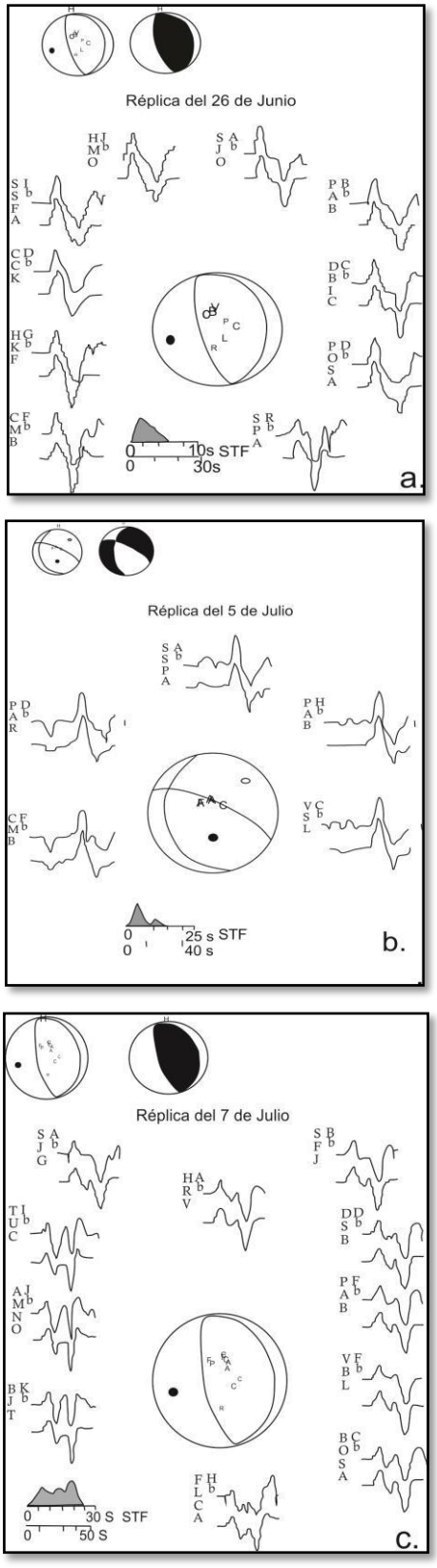


Figura 4.5. *Resultados del modelamiento de ondas P para las réplicas del terremoto de Arequipa a) 26 de Junio, b) 5 de Julio y c) 7 de Julio (Redibujado de Tavera et al., 2002).*

4.4. TSUNAMI

El terremoto de Arequipa del 2001 fue seguido por un tsunami que se inició 15 minutos después de ocurrido el sismo principal, con el replegamiento del mar, principalmente entre las playas de las localidades de Chala e Ilo. Por ejemplo, en las playas de las localidades de Atico y Ocoña, el mar se replegó hasta 200 metros y en su retorno inundó las playas entre 30 a 50 metros principalmente por la desembocadura del río Ocoña.

En Camaná, el mar se retiró 200 metros y su retorno produjo importantes daños con las olas que alcanzaron 7-8 metros de altura entre las playas La Chira y Las Cuevas (Figura 4.6). La máxima altura de ola fue observada en las playas El Chiflón y El Chorro en las inmediaciones de la desembocadura del río Camaná y del lago Tilimaco.

En las playas de Camaná la inundación ocurrió oblicuamente a la línea de costa y se extendió a lo largo de 23km aproximadamente. La inundación perpendicular a la línea de costa osciló entre 50 y 1300 metros, siendo la máxima en la playa El Chiflón. El tsunami inundó 200 hectáreas de suelo en las playas El Chorro, La Punta y Las Cuevas; en este escenario 3500 casas fueron dañadas.

Los datos obtenidos indican que los volúmenes de agua que siguieron al tsunami entre las localidades de Chala, Atico y Ocoña formaron corrientes de agua que discurrieron en dirección SE; mientras que en las localidades de Matarani y Mollendo las olas siguieron una dirección NO. Esta información indica que el tsunami se propagó de forma casi perpendicular a la línea de costa.

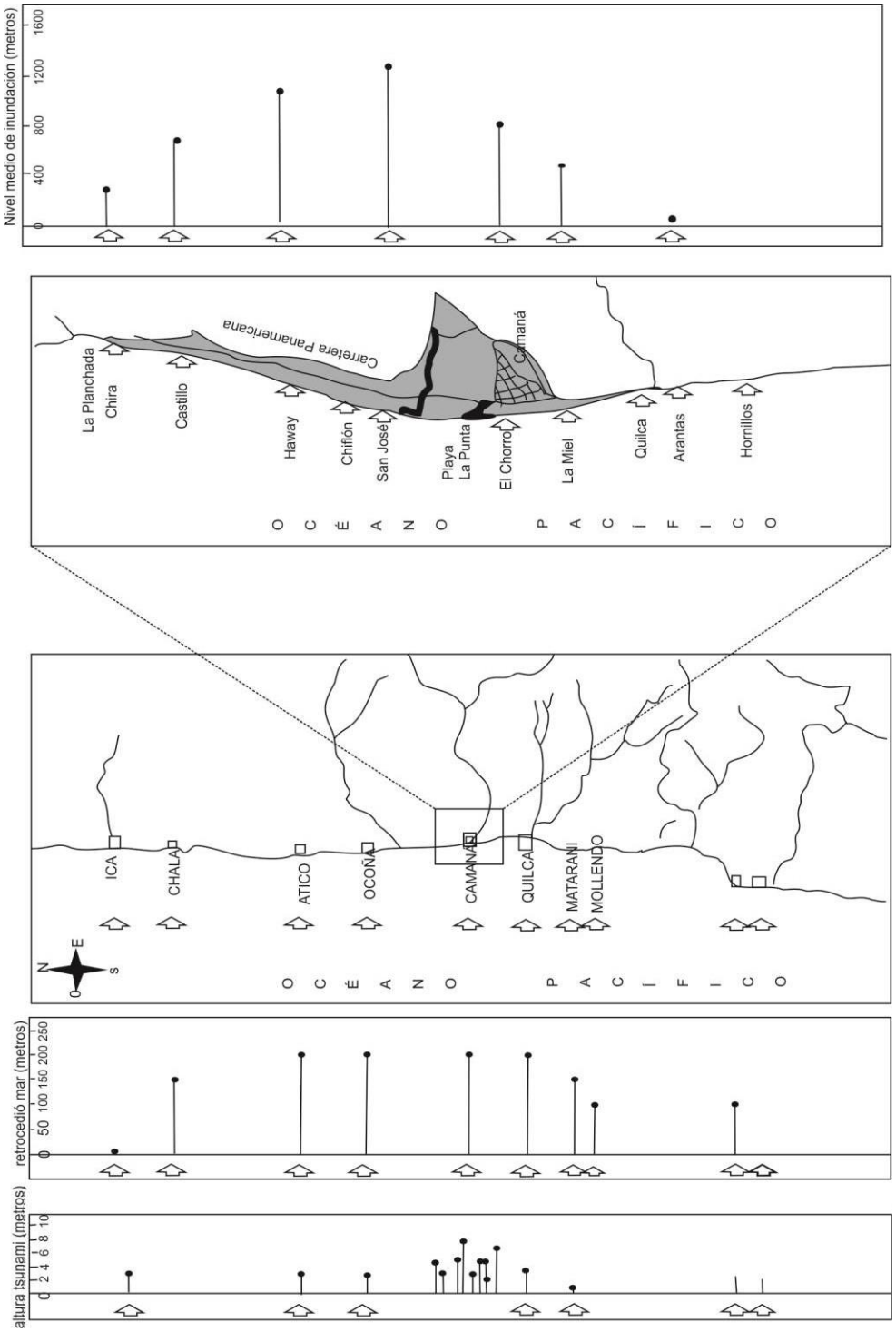


Figura 4.6. *Principales parámetros y características del tsunami que afectó la localidad de Camaná en Arequipa. Las líneas perpendiculares a la línea de Costa indican la máxima altura de las olas. El área sombreada corresponde al área inundada por el tsunami (Redibujado de Tavera et al., 2006).*

CAPÍTULO V

DINÁMICA Y PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA

5.1. MODELOS DE FUENTE SÍSMICA

La ocurrencia de un terremoto es un proceso complejo y heterogéneo, los sismos son consecuencia de una caída de esfuerzos seguido del deslizamiento de una zona previamente fallada. Con la finalidad de representar la complejidad de la ruptura se desarrollaron los modelos de Barreras (Das y Aki, 1977) y Asperezas (Kanamori, 1981).

5.1.1. Modelo de Barreras

La ruptura tiene lugar bajo condiciones uniformes de esfuerzos, con regiones de distinta resistencia, las barreras son zonas de fallas que oponen una fuerte resistencia a la ruptura y pueden reducir la velocidad de propagación de la ruptura o detenerla completamente (Dass y Aki, 1977).

El modelo de barreras se explica a partir del estado de esfuerzos antes y después de un terremoto, así como el deslizamiento de la falla, así como el deslizamiento de la falla. En la Figura 5.1.a, suponiendo que durante el terremoto se han roto dos puntos en la falla (zona sin sombrear). En los perfiles adyacentes, se observa que los esfuerzos antes del terremoto son uniformes, la variación es pequeña y no significativa. Durante el terremoto, la ruptura se produce en las áreas sin sombrear y los esfuerzos se relajan hasta llegar a un valor cero, produciéndose una transferencia de esfuerzos a los bordes y en las uniones entre las fallas, la tensión aumenta impidiendo que se deslice, éstas zonas son llamadas

barreras o zonas de alta resistencia. El deslizamiento se produce únicamente en dos puntos de la falla, son las áreas sin sombrear, porque las barreras reducen considerablemente el movimiento de sus compartimientos. En general, el modelo de Barreras describe mejor los terremotos asociados a deformaciones corticales, fallas que se caracterizan por producir terremotos de magnitud moderada (Tavera, 1992).

5.1.2. Modelo de Asperezas

El modelo de asperezas, se define como el lugar donde se inicia el proceso de ruptura en un medio muy heterogéneo, debido a que ya hubo terremotos anteriormente entonces ésta zona se encuentra libre de esfuerzos. En la Figura 5.1.b, el estado inicial es una gran falla que ha sufrido una serie de terremotos, que en su interior aún queda una serie de puntos que no se han roto. La zona liberó energía con los terremotos precedentes, quedando solo dos puntos resistentes que no se han roto (áreas sombreadas).

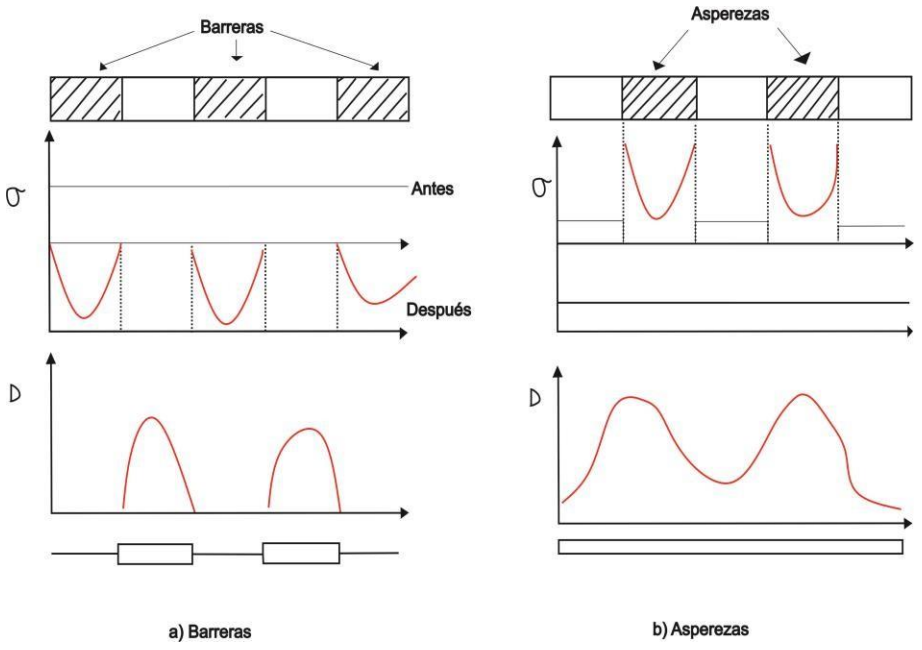


Figura 5.1. *Modelos de ruptura sísmica, a) Barreras y b) Asperezas. De arriba hacia abajo se muestra el plano de falla, el estado de los esfuerzos antes y después de la ruptura, asimismo el deslizamiento producido, (Redibujado de Tavera, 1992).*

El nuevo terremoto iniciará en una de estas áreas o en cadena. Explicando el comportamiento de los esfuerzos, casi la totalidad de la falla ya liberó energía y los esfuerzos se encuentran en las zonas resistentes. Durante los terremotos posteriores, la energía se liberará totalmente y la situación final será de esfuerzos casi uniformes. El deslizamiento producido es similar al Modelo de Barreras, en las áreas con caída de esfuerzos apenas si hay deslizamiento (Tavera, 1992). El modelo de Asperezas se aplica a los grandes terremotos ocurridos en el borde occidental del Perú, producto del proceso de subducción.

5.2. MODELOS DE RUPTURA CIRCULAR

En 1910 Reid presentó un modelo esquemático de la acumulación de esfuerzos en la litósfera y su súbita relajación por los terremotos. Posteriormente numerosos investigadores hicieron esfuerzos para formular un modelo de la ruptura sísmica en base a esta hipótesis, Haskell (1964), Maruyama (1963) y Burridge (1964) propusieron el modelo de dislocación, el cual considera al terremoto como la propagación de una dislocación o discontinuidad de desplazamiento en la superficie de una falla. Este modelo cinemático permite definir a las ondas sísmicas generadas por el deslizamiento entre los bordes de una falla y es utilizado en todos los métodos de inversión de la fuente sísmica a partir de registros de campo cercano y lejano, así como en la interpretación de datos geodésicos. Los terremotos de gran magnitud abarcan grandes áreas de ruptura, con formas irregulares y el área de ruptura podría estar compuesta por varias áreas de ruptura conectadas o separadas, de aquí la complejidad de la fuente que da origen a los terremotos. En la presente investigación se considera el Modelo de Brune.

5.2.1. Modelo de Brune

Brune propone un modelo con esfuerzos de cizalla aplicados a una fuente circular. Un plano de falla circular de radio finito sobre el cual se aplica instantáneamente un pulso de esfuerzo de cizalla (Figura 5.2). No hay propagación de fractura porque el esfuerzo se aplica

instantáneamente sobre toda el área de la falla, el pulso genera una onda de cizalla que se propaga perpendicularmente al plano de falla (Brune, 1970).

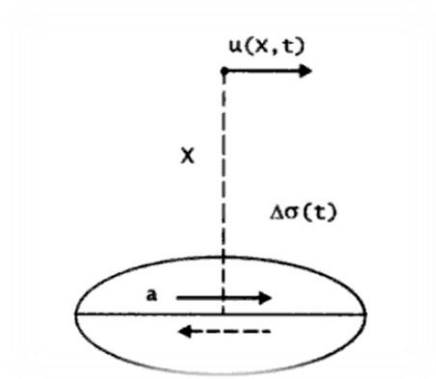


Figura 5.2. *Modelo de Brune para una falla circular.*

Adaptando la notación de Brune, para el pulso de esfuerzos se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta\sigma(x,t) = \Delta\sigma H\left(t - \frac{x}{\beta}\right) \qquad (5.1)$$

En la ecuación 5.1, $\Delta\sigma$ corresponde al esfuerzo de cizalla efectivo, ΔH es la transformada de la función temporal de la fuente, x es la distancia normal al plano de falla y β la velocidad de la onda S. El desplazamiento de cizalla Δu, para x=0, es obtenido por integración de la ecuación 5.1 teniendo en cuenta que $\sigma = \mu \partial u/\partial x$ es:

$$\Delta u(t) = H(t)\frac{\Delta\sigma}{\mu}\beta t \qquad (5.2)$$

Su transformada de Fourier es:

$$\Delta U(\omega) = -\frac{\Delta\sigma\beta}{\mu\omega^2} \qquad (5.3)$$

El espectro es:

$$U(\omega) = \frac{\Delta\sigma\beta}{\mu}\ \frac{1}{\omega^2+b^2} \qquad (5.4)$$

$$b = \frac{2.34\beta}{a} \qquad (5.5)$$

Donde a es el radio de la falla. El espectro tiene una parte plana y una caída de frecuencias, entonces la frecuencia esquina $\omega_c = b$.

En 1973, J. Brune et al., analizó 144 réplicas del terremoto de San Fernando, California (1971), utilizando el registro de la onda P y S, se determinaron los valores de frecuencia esquina con la finalidad de analizar la fuente sísmica, para lo cual se elaboraron los espectros de desplazamiento (Figura 5.3).

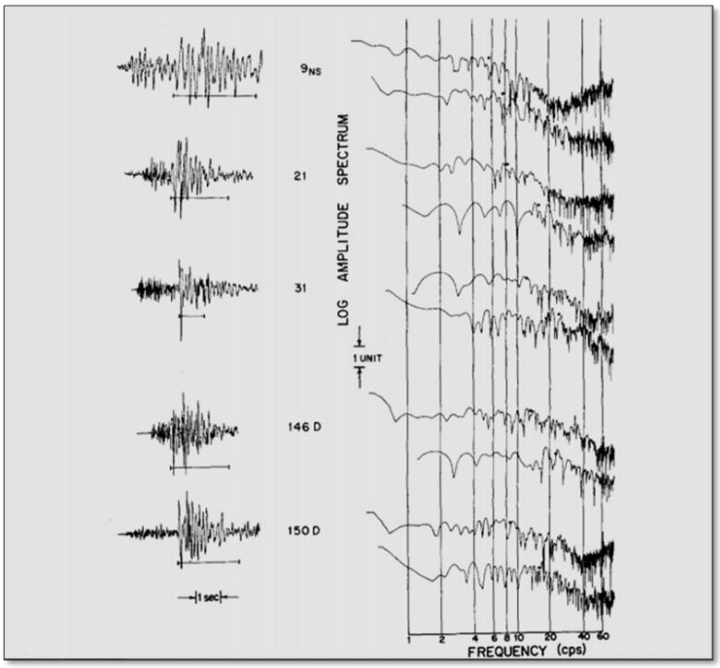


Figura 5.3. *Sismogramas y espectros para cinco réplicas del terremoto de San Fernando (1971). Las flechas debajo de los sismogramas indican la parte de la onda S utilizada para el espectro de Fourier (Brune, 1973).*

El radio de falla (a) deducido a partir de la frecuencia esquina del espectro de ondas S (Brune, 1970, 1971), se define como:

$$a = 0.37\beta/\omega_c \qquad (5.6)$$

5.2.2. Modelo de Madariaga

Este modelo considera una ruptura nucleada en un punto y se expande a una velocidad constante (Madariaga, 1976). La falla detiene su crecimiento instantáneamente en el tiempo:

$$t_r = a / V_R \qquad (5.7)$$

Donde:

t_r = tiempo de ruptura
a = radio
V_R = velocidad de ruptura

De acuerdo a la relación, la longitud de ruptura final corresponde al radio a. La geometría del problema es descrita en la Figura 5.4. La ruptura comienza y se propaga radialmente manteniendo una forma circular hasta que encuentra los bordes de la zona frágil de la corteza, quedando limitada al interior de la llamada zona de fractura.

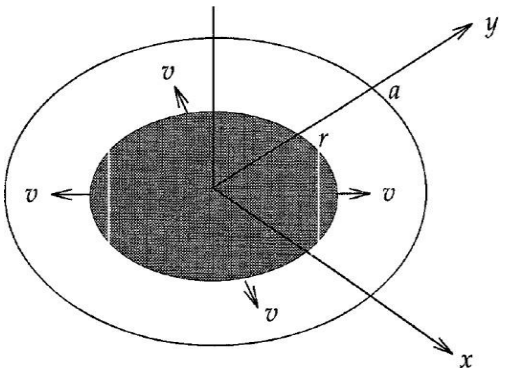


Figura 5.4. *Modelo de Madariaga para una falla circular.*

La zona irrompible que impide la propagación de la fractura se denomina barrera sísmica. La presencia de estas barreras ha sido determinada no solamente por la radiación sino por observaciones hechas en fallas activas. A pesar de la aparente sencillez, es difícil resolver la dinámica de la fuente por lo cual se asume que la barrera es circular y concéntrica al punto de iniciación de la ruptura (Madariaga, 1979). El problema presenta así una simetría circular y se puede

resolver numéricamente en coordenadas cilíndricas. En este modelo se supone que la ruptura se propaga con una velocidad constante *v*, hasta alcanzar una barrera situada a un radio finito *a*.

5.3. PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA

Los parámetros de la fuente sísmica son obtenidos usando dos características de los espectros de amplitud del desplazamiento del suelo, la frecuencia esquina (fc) y la parte plana del espectro (Ω) (Hanks y Wyss, 1972; Thatcher, 1972; Wyss y Hanks, 1972; Kondorskaya et al., 1979; Kulhanek et al., 1983; Scherbaum y Stoll, 1983; Stavrakakis et al., 1989). El modelo de Brune se usa para obtener las dimensiones de la falla, a partir del espectro de la ondas S de terremotos de tamaño moderado a pequeño (ML<6), para este tipo de eventos sísmicos el modelo de fuente circular es la mejor aproximación. En esta investigación los valores de los parámetros de la fuente, inferidos del espectro sísmico están basados en el modelo de Brune (1970, 1971).

5.3.1. Momento sísmico escalar

El momento sísmico escalar (M_0) representa la energía liberada por un terremoto (Aki ,1966) y está basado en la hipótesis que los terremotos son causados por fracturas de cizalla en la corteza de la Tierra. En el sistema CGS el momento sísmico está dado en Dina-centímetro y en el sistema MKS sus unidades son Newton-metro, siendo definido por la siguiente ecuación (Keilis-Borok, 1960):

$$Mo = \frac{\Omega\, 4\pi\, \rho\, \alpha^3 R}{R_{\theta\varphi} F} \qquad (5.8)$$

Donde:

Ω = parte plana del espectro

F = coeficiente de superficie libre

$R_{\theta\varphi}$= patrón de radiación

ρ = densidad del medio

α = velocidad de la onda S

R = distancia hipocentral

De esta ecuación se deduce que la parte plana del espectro (Ω) es directamente proporcional al momento sísmico (Aki, 1967; Hanks y Wyss 1972; Thatcher, 1973; Stavrakakis et al., 1989); sin embargo, debe ser corregido por los coeficientes de propagación de onda y con las propiedades físicas del medio.

La magnitud momento símico (Mw) es una escala logarítmica basada en la medición de la energía liberada por un sismo, se obtiene usando la relación $Mw=2/3Log\ (M_0)-6$, Kanamori y Anderson (1975).

5.3.2. Radio de fractura

De acuerdo al modelo de Brune y considerando un modelo de ruptura circular, el radio de la ruptura es obtenido en base a la frecuencia esquina (f_c) y está definido por:

$$r = 0.37\alpha/f_c \qquad (5.9)$$

Donde:

r = radio de una fuente circular

α = velocidad de la onda S

f_c = frecuencia esquina

Una característica general de todos los modelos de dislocación es que la parte plana del espectro es proporcional a el momento sísmico Mo, y la frecuencia esquina proporcional a la recíproca de la dimensión del radio de ruptura (Keilis-Borok, 1959; Maruyama, 1963; Ben Menahem et al., 1965; Aki, 1967).

5.3.3. Caída de esfuerzos

En un modelo de fractura simplificada, el desplazamiento relativo $\Delta\mu$ de los lados de una falla es debido a los esfuerzos de cizalla, los cuales en un momento dado exceden la resistencia del material o la fricción que mantiene la falla.

Si los esfuerzos de cizalla que actúan en el plano de falla antes y después de un terremoto son σ_0 y σ_1, se pueden definir dos nuevos conceptos llamados, el "esfuerzo medio $\overline{\sigma}$" que es el valor promedio de la suma de los esfuerzos actuantes antes y después de un terremoto y la "caída de esfuerzos $\Delta\sigma$", la cual se define como la diferencia entre el esfuerzo inicial (σ_0) y esfuerzo final (σ_1), es decir, antes y después de la ruptura (Figura 5.5).

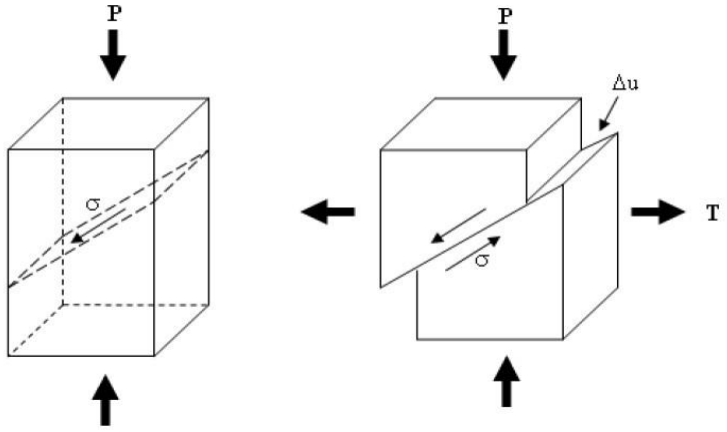


Figura 5.5. *Esfuerzos (a) antes y (b) después de la ocurrencia de la ruptura. $\Delta\mu$ es el deslizamiento y $\Delta\sigma$ la caída de esfuerzos (Aki y Richards, 2002).*

$$\text{Esfuerzo Medio} \quad \overline{\sigma} = \frac{1}{2}(\sigma_0+\sigma_1) \qquad (5.10)$$

$$\text{Caída de esfuerzos} \quad \Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_1 \qquad (5.11)$$

La caída en esfuerzos representa la parte de esfuerzos actuantes que es empleado para producir el deslizamiento de la falla. Si $\sigma_1 = 0$, o si no hay fricción la caída de esfuerzos es total. Debido a la fricción entre los dos lados de la falla hay siempre algunos esfuerzos residuales σ_1 después que el fracturamiento ha terminado.

El esfuerzo inicial σ_0 es el esfuerzo tectónico responsable de la deformación en la región focal. Conocido $\Delta\sigma$, otro parámetro sismológico que es posible estimar es la "energía total liberada" y para ello se utiliza la siguiente relación:

$$E = \overline{\sigma}\ \overline{\Delta\mu}\ S \qquad (5.12)$$

$\overline{\sigma}$ representa la fuerza, y al sustituir esto en la ecuación 5.8 se obtiene:

$$E = \frac{\overline{\sigma}}{\mu} Mo \qquad (5.13)$$

Nuevamente, si la caída de esfuerzos es total, la ecuación 5.12 queda como:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} M_0 \qquad (5.14)$$

Esta expresión relaciona la energía total liberada por un terremoto con el momento sísmico y la caída de esfuerzos. En el caso de una fractura de cizalla, la caída de esfuerzos es proporcional a la deformación de la falla, $\Delta\sigma = \Delta\mu/L'$, donde L' es la longitud del plano de falla (por ejemplo, para una falla circular L'=a y a = radio). Entonces la caída de esfuerzos para una falla circular está dada por:

$$\Delta\sigma = C\mu\ \frac{\Delta\mu}{a} \qquad (5.15)$$

Donde, C es un factor adimensional que depende de la forma de la fractura. De las ecuaciones 5.14 y 5.15, se puede deducir la relación existente entre el momento sísmico y la caída de esfuerzos para una falla circular será:

$$M_0 = \frac{16}{7}\ a^3 \Delta\sigma \qquad (5.16)$$

Entonces, la caída de esfuerzos puede ser conocida a partir del momento sísmico y el radio de fractura, utilizando la siguiente relación:

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16a^3} M_0 \qquad (5.17)$$

5.3.4. Energía sísmica

Cuando se produce un terremoto la cantidad de energía liberada es difícil de calcular con precisión, la mayor parte de dicha energía se acumula en la roca y al disiparse lo hace en forma térmica y en forma de ondas sísmicas. La energía sísmica es la única que puede ser estimada a partir del registro de los sismos; por lo tanto, se asume que el tamaño de los sismos puede ser conocido a partir de la cantidad de energía liberada por ellos. En sismología, el tamaño de los sismos es estimado a partir de las amplitudes máximas del registro de las ondas de volumen ó superficiales expresados en valores para la magnitud mb ó Ms, tal como lo propone Gutenberg y Richter (1956):

$$\text{Log } E = 5.8 + 2.4\ mb \qquad (5.18)$$

$$\text{Log } E = 11.8 + 1.5\ Ms \qquad (5.19)$$

Según estas ecuaciones, un sismo de magnitud mb= 7.0 tendría que liberar 3.98E+22 ergios de energía, equivalente a la explosión de 199000 toneladas de TNT, trinitrotolueno (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. *Magnitudes en comparación con la energía sísmica liberada y la cantidad de TNT.*

Magnitud Local	Energía (ergios)	Equivalencia (TNT)	Referencias
-1.5	1.58E+02	1g	Rotura de roca en laboratorio
1.0	1.58E+08	170 g	Explosión en construcción
3.5	1.58E+14	455 kg	Explosión en mina
4.5	3.98E+16	32 t	Tornado promedio
5.5	1.00E+19	500 t	Terremoto de Cusco, 1986
6.0	1.58E+20	1270 t	Terremoto de Lima, 1993
6.5	2.51E+21	31550 t	Terremoto de Moyobamba,1991
7.0	3.98E+22	199000 t	Terremoto de Chimbote, 1996
7.5	6.31E+23	1000000 t	Terremoto de Nazca, 1996
8.0	1.00E+25	6270000 t	Terremoto de Lima, 1940
8.5	1.58E+26	31550000 t	Terremoto de Lima, 1746
9.0	2.51E+27	19999000 t	Terremoto de Arequipa, 1868
10.0	6.31E+29	6.3 billón t	Terremoto de Chile, 1960

La energía liberada por la bomba atómica es equivalente a un sismo ocurrido en superficie con magnitud 6mb. Choy y Boatwright en 1995 definieron la magnitud energía con la siguiente relación:

$$Me = 2/3 \text{ Log } E - 2.9 \qquad (5.20)$$

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE SEÑALES SÍSMICAS

6.1. REGISTROS SÍSMICOS

Un sismograma representa el movimiento del suelo registrado por un sismómetro. Los sismos pueden ser debidos a fuentes naturales como son los terremotos, o fuentes artificiales como los explosivos (sismos inducidos). De las dos ondas principales que caracterizan a un sismo, las ondas P se propagan a mayor velocidad y son las primeras en ser registradas (Figura 6.1). Después llegan las ondas S con menor velocidad.

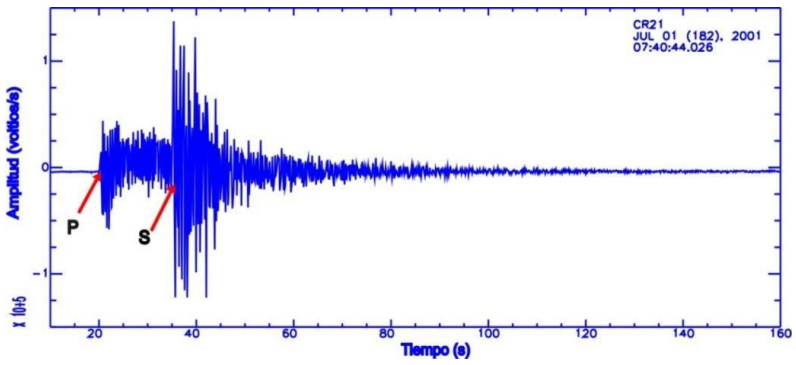


Figura 6.1. *Ejemplo del registro de un sismo en el campo cercano. P y S, corresponden a los tiempos de llegada de ambas fases.*

Estos registros representan la primera información disponible para estudiar las características de la fuente sísmica que dio origen al sismo. En principio, la forma del registro depende de la fuente (Ft), la perturbación del medio (Qt) y del instrumento de registro (It) y en algunos casos de los efectos de sitio. Sin embargo, cuando se hacen los estudios en el campo cercano, el registro del sismo representa una superposición de diferentes tipos de ondas, por lo

que la lectura e interpretación de los mismos se convierte en una tarea compleja.

6.2. CORRECCIONES DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

Considerando que el registro de velocidad es el resultado de los procesos que se desarrollan en Fw, Qw e Iw, se deben aplicar dos tipos de correcciones, la primera corrección de línea base y la segunda, la corrección instrumental.

6.2.1. Corrección de línea base

En algunos casos los registros de velocidad se encuentran desplazados respecto a la línea base (Línea de amplitud cero), esto se debe a que el sistema de registro provoca una deriva de los datos respecto al valor cero de amplitud (Figura 6.2.a y b) y para su análisis debe ser corregido a fin de lograr control sobre las amplitudes de la señal sísmica.

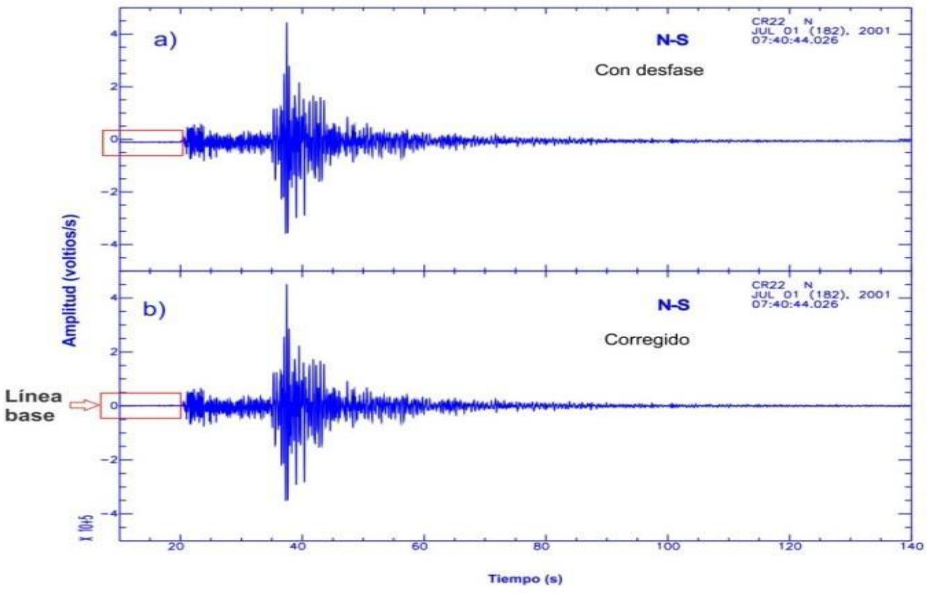


Figura 6.2.a) *Registro de velocidad sin corregir para una réplica del terremoto de Arequipa del 2001, obsérvese que el registro se encuentra por debajo de la línea base;* ***b)*** *Registro de velocidad, al cual se aplicó la corrección de línea base.*

6.2.2. Corrección instrumental

En el dominio de las frecuencias, el sismograma observado S(t) es el resultado de la convolución (Figura 6.3) de tres funciones temporales:

F(t)= función que caracteriza a la fuente

Q(t)= perturbación del medio o atenuación

I(t)= función de respuesta del instrumento

$$S(t)=F(t)*Q(t)*I(t) \qquad (6.1)$$

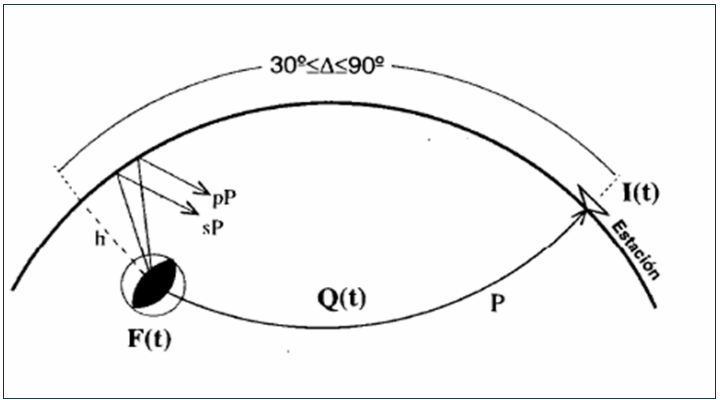


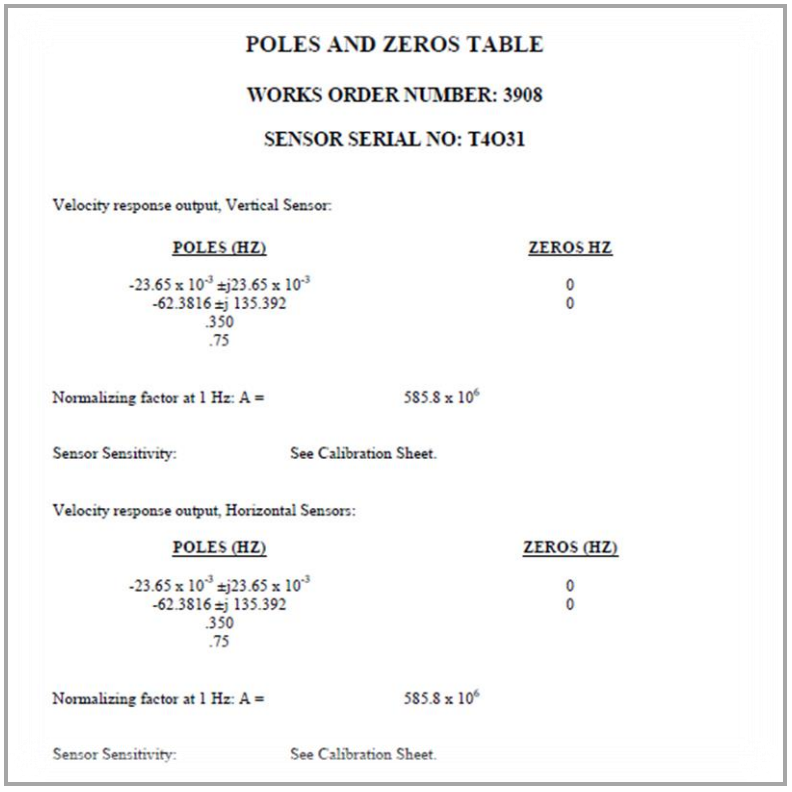
Figura 6.3. *Representación del cálculo de un sismograma teórico para una fuente puntual en el campo lejano. La función temporal de la fuente sísmica (F(t)) se combina con la atenuación del medio (Q(t)) y el instrumento (I(t)) mediante una operación de convolución (Tavera, 1998).*

De estas funciones, la que determina la respuesta instrumental I(t) es definida en la ficha técnica del sismómetro en términos de Polos y Zeros, Figura 6.4.

La función Q(t) en el campo lejano es igual a 1 en razón que las ondas se propagan en el manto. En el campo cercano es definida por el coeficiente de expansión geométrica y/o coeficiente de superficie libre. La función F(t) permitirá definir el tamaño del sismo mediante el momento sísmico. Entonces:

$$\frac{S(t)}{I(t)} = F(t)*Q(t) \qquad (6.2)$$

$$S(t) = \text{real}\ \left(\text{IFF}\ \frac{S(t)}{I(t)}\right) = S(t) = F(t)*Q(t) \qquad (6.3)$$



POLES AND ZEROS TABLE

WORKS ORDER NUMBER: 3908

SENSOR SERIAL NO: T4O31

Velocity response output, Vertical Sensor:

POLES (HZ)	ZEROS HZ
$-23.65 \times 10^{-3} \pm j23.65 \times 10^{-3}$	0
$-62.3816 \pm j$ 135.392	0
.350	
.75	

Normalizing factor at 1 Hz: A = 585.8×10^{6}

Sensor Sensitivity: See Calibration Sheet.

Velocity response output, Horizontal Sensors:

POLES (HZ)	ZEROS (HZ)
$-23.65 \times 10^{-3} \pm j23.65 \times 10^{-3}$	0
$-62.3816 \pm j$ 135.392	0
.350	
.75	

Normalizing factor at 1 Hz: A = 585.8×10^{6}

Sensor Sensitivity: See Calibration Sheet.

Figura 6.4. *Ficha técnica de un sismómetro Guralp 40T.*

En la Tabla 6.1 se presenta la tabla de Parámetros instrumentales de siete estaciones de la Red Sísmica Local: Bella Unión (BUN), Caravelí (CRV), Ocoña (OCO), Pocoma (PCM), Quilca (QLC), Tocota (TCT) y Tanaka (TNK). Una cuenta (cta) equivale a 1.907e-^{6} voltios, N-S y E-W corresponde a las componentes Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente, la corrección instrumental finalmente está expresada en unidades de centímetros por segundo.

Tabla 6.1. *Parámetros instrumentales de las estaciones de la Red Sísmica Local.*

Estación	Registrador	Sensor	V/(m/s)	Corrección	cm/seg
	uV/cta	N-S	E-W	N-S	E-W
BUN	0.000001907	798.0	808.0	2.39E-07	2.36E-07
CRV	0.000001907	803.6	796.4	2.37E-07	2.39E-07
OCO	0.000001907	802.2	798.2	2.38E-07	2.39E-07
PCM	0.000001907	798.0	808.0	2.39E-07	2.36E-07
QLC	0.000001907	794.0	806.6	2.40E-07	2.36E-07
TCT	0.000001907	804.2	800.6	2.37E-07	2.38E-07
TNK	0.000001907	796.0	804.0	2.40E-07	2.37E-07

En la figura 6.5 se muestra el registro de una réplica del sismo de Arequipa, registrada el 01/07/2001 en la estación Caravelí, sin corrección instrumental 6.5.a, la amplitud del registro sísmico está en cuentas y con corrección instrumental 6.5.b sus unidades están en cm/s.

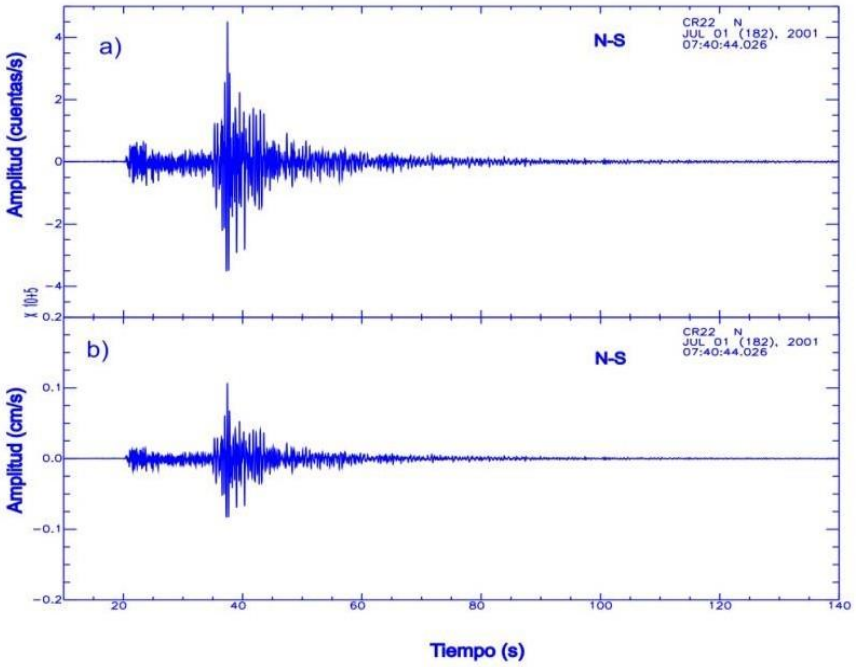


Figura 6.5.a) *Registro de la réplica del sismo de Arequipa del 2001 sin corrección instrumental, la amplitud está expresada en cuentas/s.* ***b)*** *El mismo registro, al cual se aplicó la corrección instrumental, la amplitud expresada en cm/s.*

6.3. EL RUIDO SÍSMICO

El ruido sísmico se define como vibraciones de la tierra debidas a la influencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas direcciones con la misma energía, es parte del registro sísmico y puede tener diferentes orígenes como la actividad del hombre sobre la superficie de la Tierra, denominado ruido cultural, ondas oceánicas, microsismos, cambios de presión atmosférica y vibraciones producidas por el viento, como se observa en la Figura 6.6.

6.3.1 Ruido cultural

Se produce por la actividad del hombre sobre la superficie de la tierra. El ruido cultural se propaga principalmente como ondas superficiales de alta frecuencia (>1-10Hz) que se atenúan a varios kilómetros de

distancia y profundidad. El ruido cultural muestra fuertes variaciones diurnas y tiene frecuencias características que dependen de la fuente de disturbio (Cutipa y Tavera, 2006).

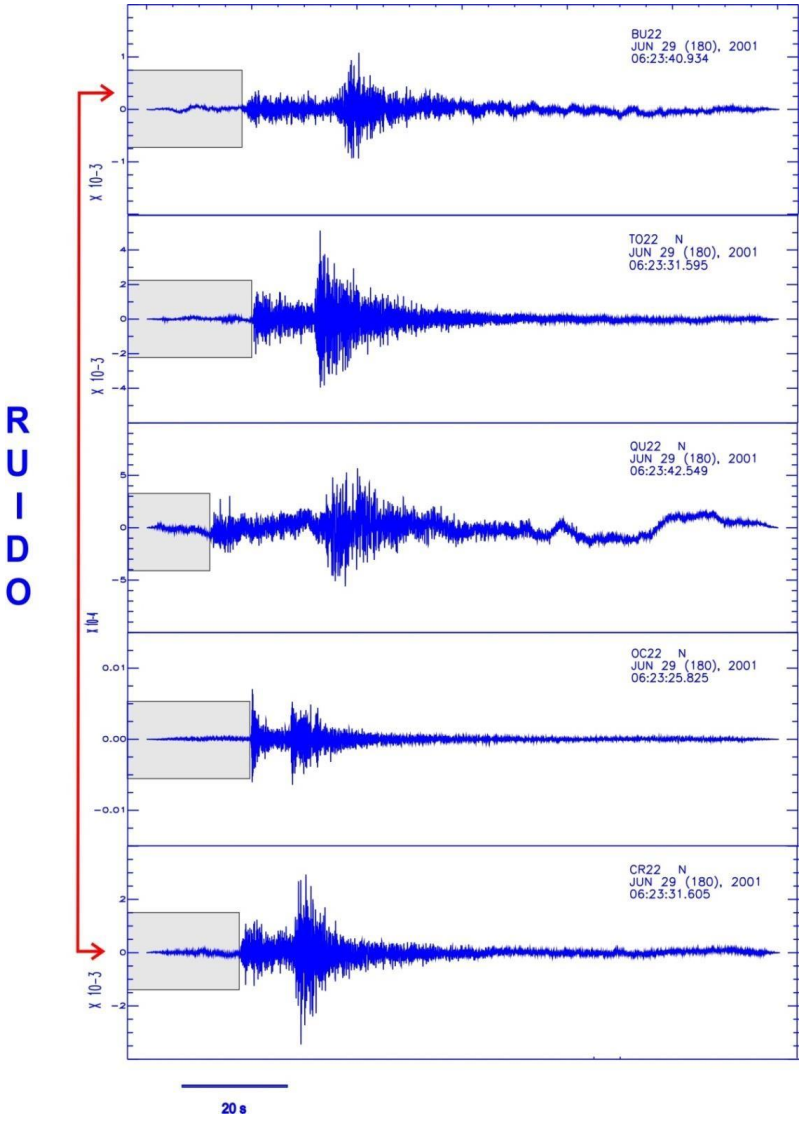


Figura 6.6. *Registros de réplicas del sismo de Arequipa con diferentes niveles de ruido sísmico (rectángulo sombreado).*

6.3.2 Ruidos de Periodo Corto

Este tipo de ruido presenta altas frecuencias con rangos que se encuentran entre 0.3-10Hz, se genera como respuesta de las condiciones geológicas de las estructuras sobre las cuales se encuentra ubicada la estación sísmica, por la actividad humana y los cambios bruscos de

temperatura durante el día y la noche. Se debe considerar como ruidos de periodo corto, a los producidos por las explosiones en las minas, el paso de camiones en las carreteras, o por la inducción del viento sobre la estación sísmica con rangos de frecuencia mayores a 10Hz. Este tipo de ruido suele ser importante si en las cercanías de la estación sísmica hay vegetación o montañas (Cutipa y Tavera, 2006).

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

6.3.3 Ruidos de Periodo Largo

Este tipo de ruido se caracteriza por presentar bajas amplitudes y largos periodos (10-300 segundos) y se presentan con mayor amplitud en las componentes horizontales del registro. Las causas de origen de este tipo de ruido son las fluctuaciones barométricas en la zona donde se encuentra la estación sísmica (Muller y Zurn, 1983). Por ejemplo, la presión del aire varía entre 0.1mHz y 0.01Hz, (Beauduin 1996).

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

6.3.4 Filtros

A fin de eliminar el ruido de fondo presente en los registros sísmicos es necesario aplicar filtros.

Un filtro es un sistema que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal sísmica, pudiendo modificar, tanto su amplitud como su fase (Britton, 1993). El filtro opera sobre señales discretas y cuantizadas, y dependiendo de las variaciones de las señales

de entrada en el tiempo y amplitud, realiza un procesamiento matemático sobre dicha señal, mediante el uso de la Transformada rápida de Fourier.

Un filtro ideal tiene una banda pasante de corte totalmente plano y unas zonas de transición entre ambas nulas, en la práctica esto nunca se consigue (Figura 6.7).

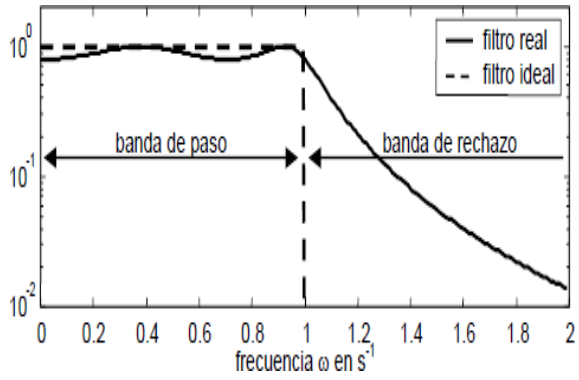


Figura 6.7. *Caracterización en el dominio de la frecuencia de un filtro paso-bajo ideal y uno no ideal.*

Los filtros de acuerdo a sus características modifican la amplitud y la frecuencia de la señal sísmica. El filtrado digital es parte del procesamiento de la señal sísmica. El rango de frecuencias atenuadas o filtradas es lo que se conoce como banda de rechazo; mientras que, las restantes forman lo que se denomina banda de paso.

Un filtro digital elemental tiene un solo coeficiente, h_0, y se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$x_t \rightarrow h_0 \rightarrow y_t = h_0\, x_t \qquad (6.4)$$

Donde x_t, es la entrada y y_t es la salida. La transformada de Fourier Discreta (DFT) es $_{(z)} = h_{0\ (z)}$, donde $z = \exp(-iw)$, $y\ H(z) = h_0$. Un filtro elemental es aquel que produce un retardo unitario:

$$x_t \rightarrow h_{1z} \rightarrow y_t = h_1 x_{t-1} \qquad (6.5)$$

Cuya transformada DFT es $Y_{(z)} = h_{1z\ (z)}$, con $(z) = h_1$. Otro filtro elemental es aquel que produce un retardo unitario, cambiando z por z^{-1} en el filtro anterior, dicha combinación permite diseñar la ecuación para un filtro general, así se tiene:

$$Y_{(z)} = h_0\ X_{(z)} + h_{1z}\ X_{(z)} + h_2\ z^2\ X_{(z)} + \ldots + h_{m-1}\ z^{m-1}\ X_{(z)} \qquad (6.6)$$

$$= (\ h_0 + h_{1z} + h_2\ z^2 + \ldots + h_{m-1}\ z^{m-1}\ )\ x_{(z)} \qquad (6.7)$$

$$= H_{(z)}\ X_{(z)} \qquad (6.8)$$

En el dominio de frecuencias, este producto implica la convolución entre la respuesta del filtro y la entrada.

6.3.4.1. Tipos de filtros

De acuerdo con la respuesta en frecuencia los filtros se clasifican en:

a) Filtro Paso-Alto, es un filtro que permite atenuar las componentes de baja frecuencia pero no las de alta frecuencia, éstas incluso podrían amplificarse (Figura 6.8).

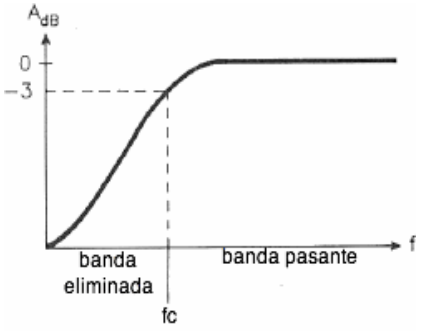


Figura 6.8. *Respuesta frecuencial del filtro Paso-Alto, (fc) es la frecuencia de corte.*

b) Filtro Paso-Bajo, este tipo de filtro permite el paso de las frecuencias más bajas y atenuar las frecuencias altas (Figura 6.8).

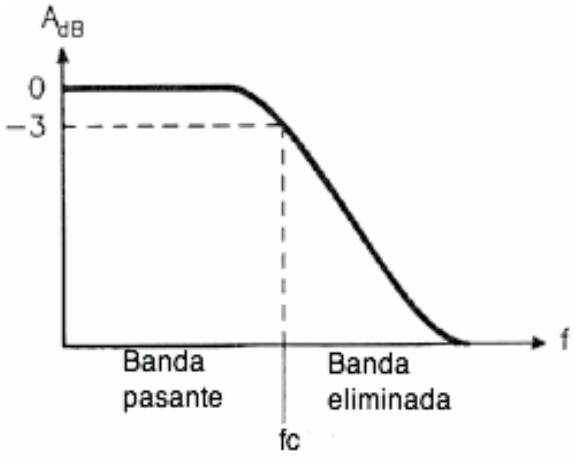


Figura 6.9. *Respuesta de un filtro Paso-Bajo.*

c) Filtro Paso-Banda, es un tipo de filtro que deja pasar un determinado rango de frecuencias de una señal y atenúa el paso del resto (Figura 6.10). Se tienen dos frecuencias de corte, una inferior (fc_1) y otra superior (fc_2).

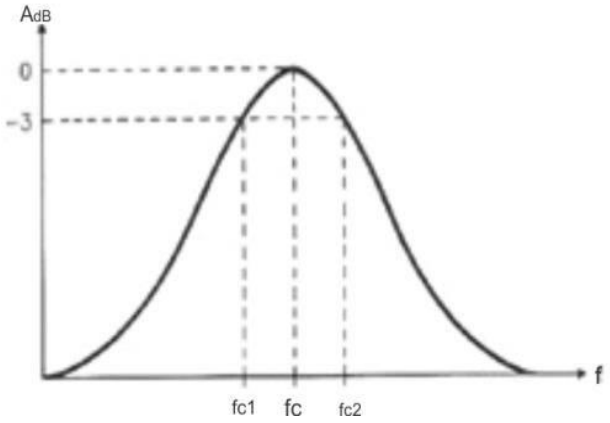


Figura 6.10. *Respuesta de un filtro Paso-banda.*

d) Filtro Elimina-Banda, el filtro atenúa las frecuencias que se encuentran entre dos valores dados, al igual que el filtro Pasa-Banda, posee dos frecuencias de corte (Figura 6.11).

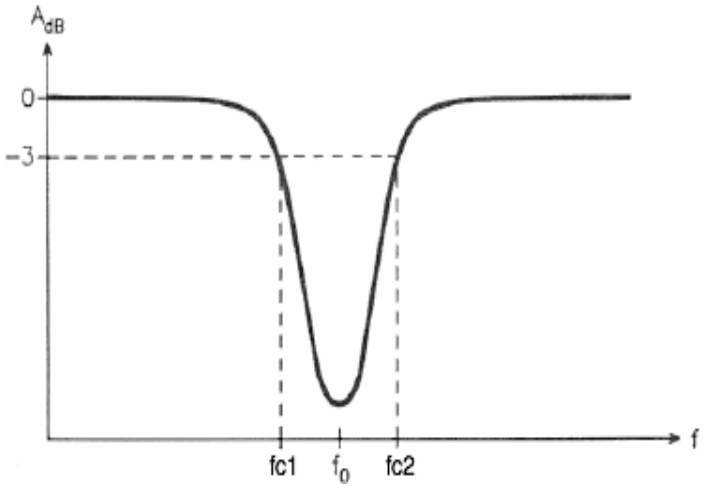


Figura 6.11. *Respuesta de un filtro Elimina-banda.*

6.4. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La transformada de Fourier descompone o separa las formas de onda en funciones sinusoidales de diferente frecuencia, las cuales suman la forma de onda original. Identifica o distingue las diferentes frecuencias sinusoidales y sus respectivas amplitudes (Brigham, 1988). Para el cálculo de la Transformada de Fourier se consideran las siguientes expresiones integrales:

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{j\omega t}.d\omega \qquad (6.9)$$

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t}.dt \qquad (6.10)$$

Cuando interesa emplear una unidad de procesamiento para la resolución de estas ecuaciones, aparece el problema de la Transformada de Fourier, debido a que no se podría aplicar directamente. El origen de esta dificultad está en que las funciones asociadas a la Transformada de Fourier son ecuaciones en el dominio continuo del tiempo y la frecuencia; es decir, toman valores infinitos en un intervalo de tiempo y frecuencia finito. Mientras que, las

señales a procesar son discretas, con un número finito de valores, entonces es necesario modificar las ecuaciones 6.7 y 6.8 para adaptarlas a la naturaleza de la información a procesar. De este modo, surge la Transformada de Fourier Discreta (DFT), (Figura 6.12), la cual hace posible aplicar Fourier en el análisis de señales digitales.

Una ventaja de la DFT es la existencia de algoritmos que permiten realizar este análisis con la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Los requisitos de la señal para aplicar la FFT son:

−Ser una señal periódica.

−Muestrear por encima del doble de la frecuencia máxima de la señal (límite de Nyquist).

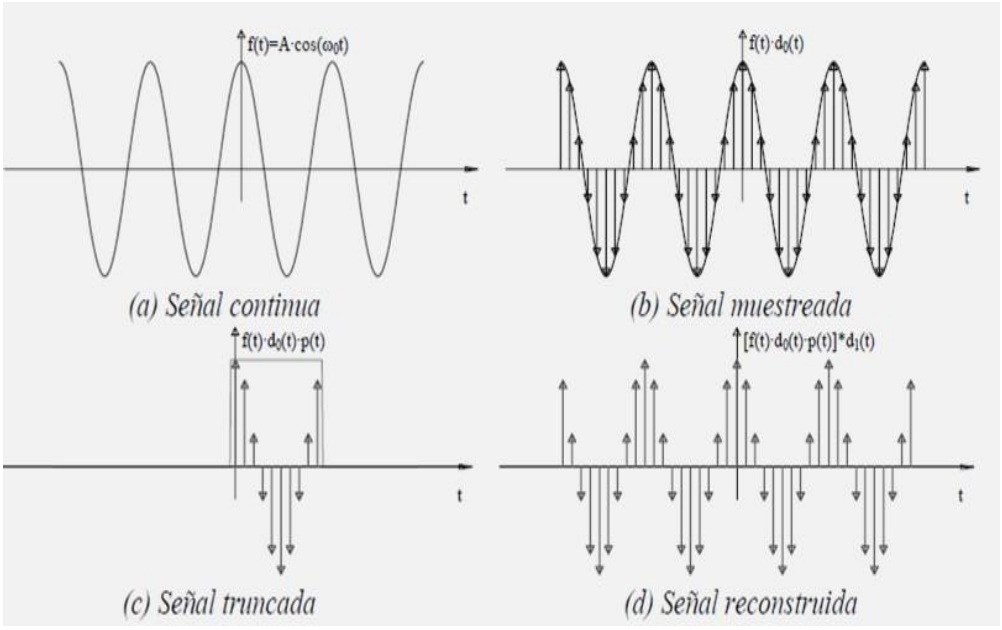


Figura 6.12. *Modificación de la señal en el proceso de aplicación ideal de la Transformada Rápida de Fourier (Brigham, 1988).*

En la figura 6.12.a y 6.12.b se presentan la señal continua y muestreada respectivamente, en el dominio del tiempo. En el truncado (Figura 6.12.c), el objetivo es obtener una señal periódica a partir de una porción de información de la señal original, el resultado es una señal reconstruida luego de aplicar la FFT (Figura 6.12.d).

Es importante resaltar que la DFT reduce considerablemente los errores de redondeo, asociados a la representación de datos numéricos en una computadora.

6.5. ANÁLISIS ESPECTRAL

En el campo cercano para un modelo de fractura circular, los parámetros de la fuente se pueden estimar a partir de dos características del espectro de amplitud de la señal sísmica, la frecuencia esquina (fc) y la parte plana del espectro (Ω), (Figura 6.13). Los valores de fc y Ω son obtenidos del espectro sísmico, el cual se obtiene a partir de una rutina computacional, la cual utiliza la Transformada Rápida de Fourier.

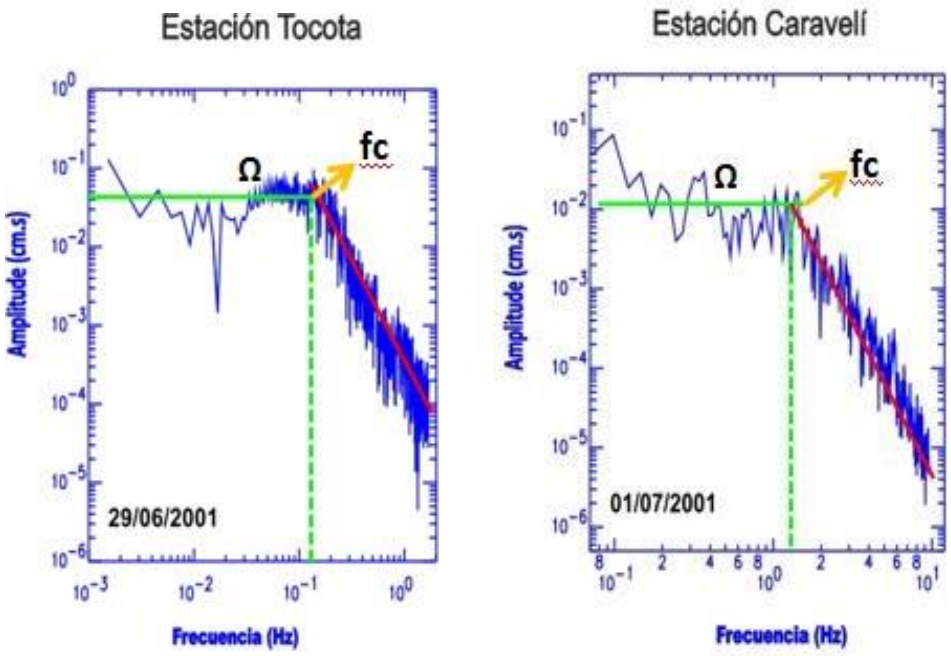


Figura 6.13. *Espectros para dos réplicas del terremoto de Arequipa, la primera registrada el 29 de Junio en la estación Tocota y la segunda registrada el 01 de Julio en la estación Caravelí. En el eje de las abscisas, la frecuencia está en Hz y en el eje de ordenadas, las amplitudes en cm.se,* Ω es la parte plana del espectro y fc la frecuencia esquina.

La frecuencia esquina es inversamente proporcional al radio de la fuente (r); mientras que, la parte plana es proporcional al momento sísmico escalar (Mo), (Hanks y Wyss, 1972). Para el campo cercano, el momento sísmico es definido por la ecuación 6.9 (Keilis-Borok, 1960):

$$Mo = 4\pi.\rho.\alpha^3.\Omega.R / R_{\theta\varphi}F \qquad (6.11)$$

Donde, α es la velocidad de la onda S, ρ la densidad del suelo, Ω la parte plana del espectro, R la distancia epicentral, $R_{\theta\varphi}$ el patrón de radiación, F el coeficiente de superficie libre. La dimensión de la fuente está definida por la ecuación 6.12 (Brune, 1970).

$$r = 0.37\alpha/fc \qquad (6.12)$$

Para el cálculo del Mo y r, en este estudio se consideran los siguientes valores:

- Densidad de la corteza (ρ) = 2.8gr/cm^3
- Velocidad de onda S (α) = 3.9km/s
- Coeficiente de superficie libre (F) = 2.0
- Patrón de radiación ($R_{\theta\varphi}$) = 0.4

En el caso de la densidad de la corteza (ρ), se utiliza el valor propuesto por Aguilar et al., (1991) en el estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Arequipa, la velocidad de la onda S corresponde al modelo de velocidad de Grange (1984), el coeficiente de superficie libre (F) y el patrón de radiación ($R_{\theta\varphi}$) corresponden a valores promedio propuestos por Boatwright (1980) y Aki y Richards (1980) respectivamente.

CAPÍTULO VII

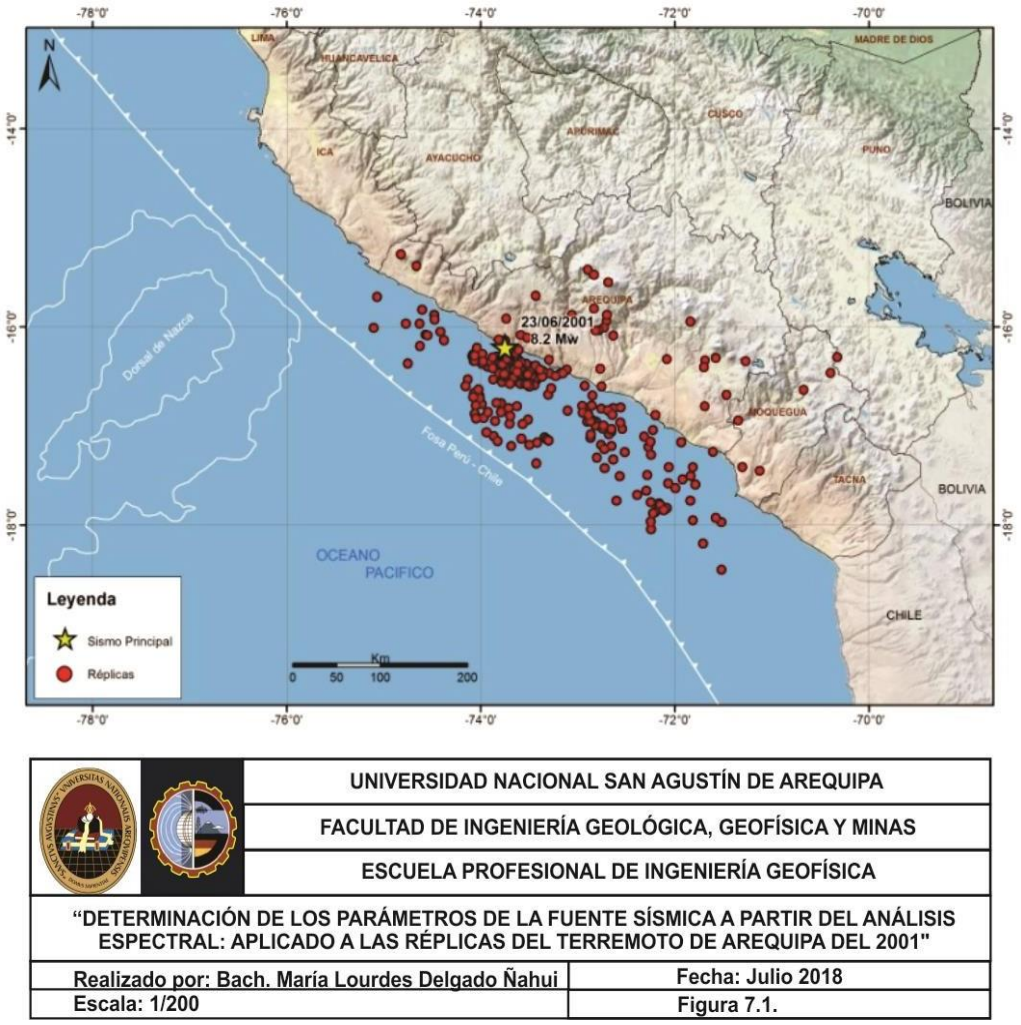
APLICACIÓN A LAS RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 2001

7.1. RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA

El sábado 23 de Junio del 2001 a las 20:33:14.2 s (UTC), la región Sur del Perú es afectada por un terremoto de elevada magnitud (Mw=8.2) y epicentro localizado a 82 km al NO del distrito de Ocoña (16.20ºS y 73.75ºO), con foco a una profundidad de 29km. En el presente estudio se realiza el análisis espectral de 292 réplicas registradas en 5 estaciones de banda ancha que operaron durante el periodo comprendido del 27 de junio al 31 de Julio del 2001 (Tabla 7.1). La finalidad es determinar los parámetros de la fuente, los cuales son el momento sísmico escalar, radio de la fractura, magnitud momento, magnitud energía y caída de esfuerzos. Las réplicas presentaron magnitudes comprendidas entre 2.4 y 5.5 ML y focos a profundidades menores a 55km y cuya distribución espacial se muestra en la Figura 7.1.

Las 292 réplicas se distribuyen principalmente entre la fosa y la línea de costa y en menor proporción sobre el continente. Asimismo, el mayor número de eventos se agrupa alrededor del sismo principal (estrella) disminuyendo su número en dirección SE hasta la ciudad de Ilo, donde habría concluido su proceso de ruptura (Tavera et al., 2006). El terremoto tendría un área rectangular de ruptura, de 300km de longitud paralelo a la costa y de 120km de ancho, evidenciado por el gran número de réplicas registradas. Según Tavera et al., (2006) el inicio de todo el proceso de ruptura fue frente a la ciudad de Ocoña y la mayor liberación de energía frente a la ciudad de

Camaná, zona donde se produjo un tsunami con olas de 8 metros de altura aproximadamente.



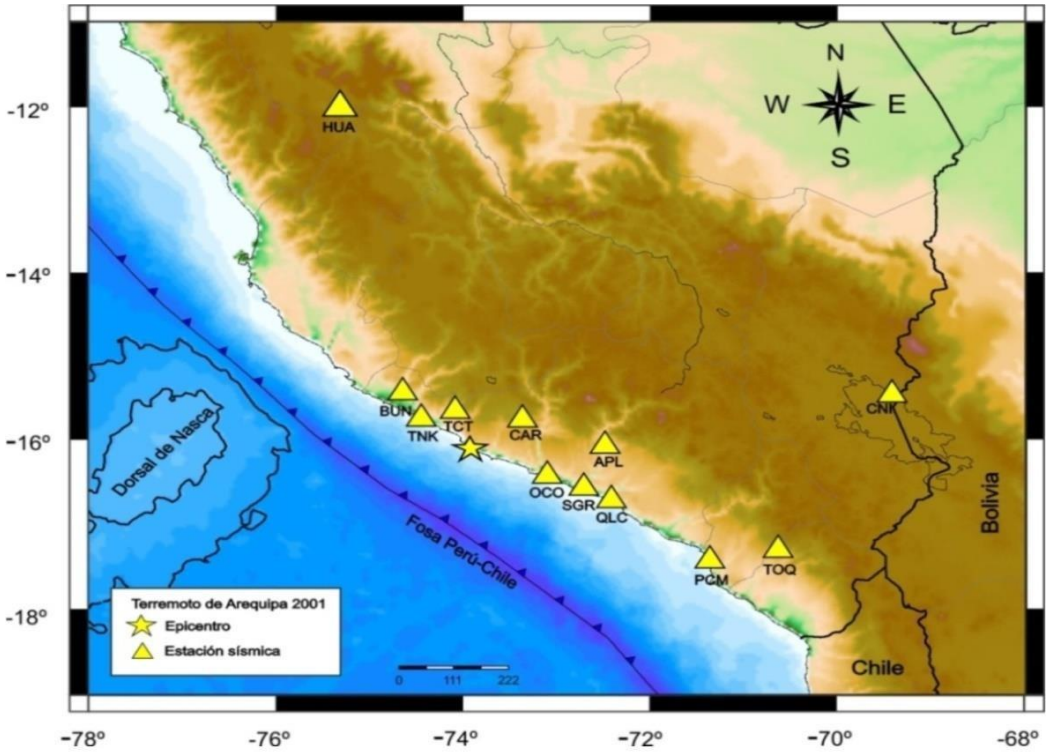
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA	
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, GEOFÍSICA Y MINAS	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA	
"DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPECTRAL: APLICADO A LAS RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 2001"	
Realizado por: Bach. María Lourdes Delgado Ñahui	Fecha: Julio 2018
Escala: 1/200	Figura 7.1.

Figura 7.1. *Epicentros de la serie de réplicas del terremoto de Arequipa del 2001.*

7.2. RED SÍSMICA LOCAL

Debido al gran número de réplicas del terremoto de Arequipa, el Instituto Geofísico del Perú dispuso instalar en el área afectada una Red Sísmica Local compuesta por 8 estaciones, más la estación de San Gregorio (SGR) perteneciente a la Red Sísmica Nacional (RSN). Esta red funcionó entre el 27 de junio al 31 de julio del 2001. Estas estaciones fueron instaladas en las localidades de Bella Unión, Tocota, Tanaka, Caravelí, Quilca y Ocoña, todas en el departamento de Arequipa. A partir del día 19 de julio las estaciones de

Bella Unión y Tocota fueron trasladadas e instaladas en las localidades de Pocoma y Aplao respectivamente. Todas las estaciones sísmicas son de banda ancha, con excepción de la estación de San Gregorio que funciona con un sismómetro de periodo corto. Además se usaron registros de tres estaciones adicionales de la Red Sísmica Nacional (RSN) (Conima, Huancayo y Toquepala). En la Figura 7.2, se presenta su distribución espacial.



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA	
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, GEOFÍSICA Y MINAS	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOFÍSICA	
"DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPECTRAL: APLICADO A LAS RÉPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 2001"	
Realizado por: Bach. María Lourdes Delgado Ñahui	Fecha: Julio 2018
Escala: 1/220	Figura 7.2.

Figura 7.2. *Distribución de estaciones sísmicas que integran la Red Sísmica Local. La estrella indica el epicentro del sismo principal.*

La ubicación geográfica de cada una de las estaciones sísmicas que registraron las réplicas analizadas en este estudio se detalla en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. *Estaciones sísmicas de banda ancha que integran la red sísmica local.*

Estación	Código	Latitud	Longitud	Altitud
Aplao	APL	-16.074	-72.489	667
Bella Unión	BUN	-15.444	-74.646	234
Caraveli	CAR	-15.763	-73.372	1879
Ocoña	OCO	-16.429	-73.109	48
Pocoma	PCM	-17.432	-71.374	196
Quilca	QLC	-16.717	-72.426	106
San Gregorio	SGR	-16.570	-72.715	161
Tanaka	TNK	-15.754	-74.452	182
Tocota	TCT	-15.659	-74.091	1006
Conima (RSN)	CNI	-15.467	-69.431	3900
Huancayo(RSN)	HUA	-12.042	-75.321	3330
Toquepala(RSN)	TOQ	-17.304	-70.643	2586

7.3. BASE Y ANÁLISIS DE DATOS

Los datos que se utilizaron en este estudio son los registros de velocidad (Banda Ancha) correspondiente a las estaciones de TOC, OCO, CAR, BUN y QLC que registraron las réplicas del terremoto de Arequipa entre los días 27 de junio al 31 de julio del 2001. En total se analizaron 292 réplicas cuyos registros fueron analizados en principio, sin embargo se trabajó con un número menor en cada una de las estaciones sísmicas principalmente por la calidad del registro sísmico.

El análisis y selección de los registros de réplicas se realizó considerando los siguientes criterios:

a) Eventos netamente locales cuya diferencia Ts-Tp sea menor a 10 segundos.

b) Registros sísmicos que no estén saturados y se pueda identificar correctamente las fases P y S en las tres componentes del registro.

c) Registros de velocidad que presenten bajos niveles de ruido.

7.4. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA FUENTE SÍSMICA

Para determinar los parámetros de la fuente sísmica de las réplicas se han seguido los siguientes pasos:

1. Identificar, seleccionar y cortar los registros de las réplicas del Terremoto de Arequipa del 2001, utilizando las componentes horizontales.
2. Aplicar la corrección de línea base.
3. Aplicación de corrección instrumental a los registros seleccionados.
4. Para eliminar el efecto de las frecuencias bajas en la señal sísmica, se aplica un filtro pasa-altos Butterworth n2 cos 0.3. Integrar la señal para disponer del registro en desplazamiento.
5. Calcular el espectro de desplazamiento de la onda S, aplicando la Transformada Rápida de Fourier.
6. En el espectro de desplazamiento se aplica el Análisis espectral, se identifica la parte plana del espectro (Ω) y la frecuencia esquina (fc) para cada espectro (Componentes horizontales) y se promedian.
7. Se determinan los parámetros de la fuente sísmica, para calcular el Momento sísmico escalar (Mo) se usa la relación propuesta por Keilis-Borok (1960) y el modelo de velocidad propuesto por Grange et al., (1984), (Tabla 7.2). Calculado el Mo, se estima el radio de ruptura y luego la caída de esfuerzos (Δσ). Conocido el Mo, la magnitud Mw se estima con la relación Mw=2/3 Log(Mo)-6, (Kanamori y Anderson, 1975). La Magnitud Energía es estimada en función de la energía radiada por el sismo usando la relación Me = 2/3 Log E_s-2.9, (Choy y Boatwright, 1995).

Tabla 7.2. Modelo de velocidad utilizado en este estudio.

Capa N°	Profundidad (Km)	Velocidad (Km/s)
1	0	5.5
2	5	6
3	30	6.8
5	50	8

Referencia: (Grange et al., 1984).

8. Elaboración de los diagramas de caída de esfuerzos (Δσ) para las estaciones Tocota, Ocoña, Caravelí, Bella Unión y Quilca.

Todo el procesamiento de las señales sísmicas se realizó en el programa Seismic Analysis Code (SAC) en el entorno de Linux.

7.5. RESULTADOS

Para la presentación y descripción de los resultados obtenidos en esta investigación se realiza estación por estación:

7.5.1. Estación Tocota

La estación Tocota ubicada en la provincia de Caravelí, departamento de Arequipa, registró 235 réplicas de las 292, siendo la mayor cantidad de réplicas, se muestran dos espectros representativos en la Figura 7.3. Luego de aplicar el análisis espectral los resultados son:

- La parte plana del espectro (Ω), varía en un rango comprendido entre $2.25e^{-6}$ y $2.96e^{-2}$cm.s.
- La frecuencia esquina (fc) varía entre 0.35 y 7.75Hz.

7.5.2. Estación Ocoña

La estación Ocoña ubicada en la provincia de Camaná, departamento de Arequipa, registró 223 réplicas, se muestran dos espectros representativos en la Figura 7.4. Los resultados presentan las siguientes características espectrales:

- La parte plana del espectro (Ω), varía en un rango comprendido entre $5e^{-6}$ y $6.50e^{-2}$cm.s.
- La frecuencia esquina (fc) varía entre 0.65 y 7.65Hz.

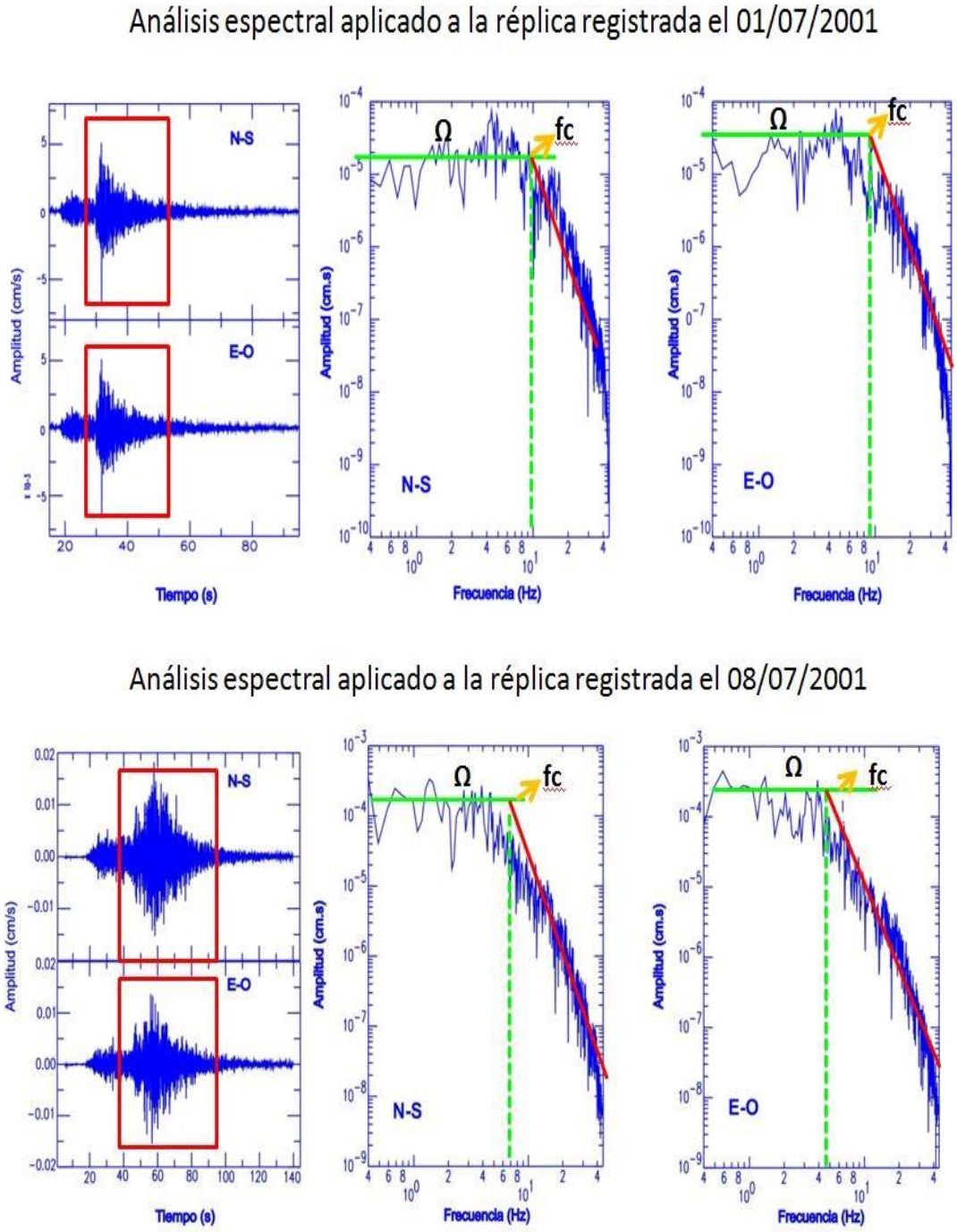


Figura 7.3. *Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Tocota, N-S (Componente Norte- Sur) y E-O (Componente Este-Oeste).*

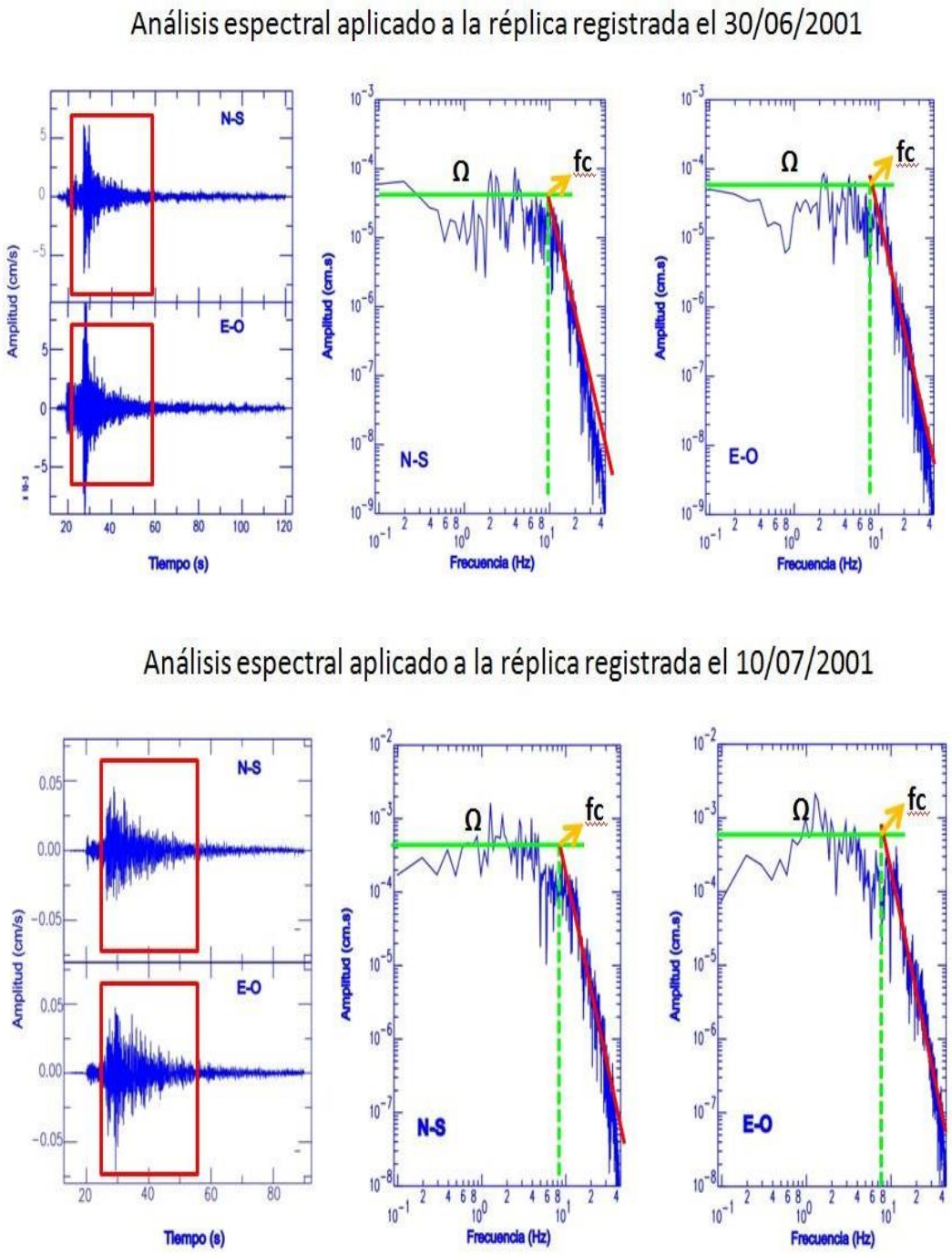


Figura 7.4. *Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Ocoña, N-S (Componente Norte- Sur) y E-O (Componente Este-Oeste).*

7.5.3. Estación Caravelí

La estación Caravelí ubicada en la provincia de Caravelí, departamento de Arequipa, registró 191 réplicas se muestran dos espectros representativos en la Figura 7.5. Los resultados presentan las siguientes características espectrales:

- La parte plana del espectro (Ω), varía en un rango comprendido entre $6e^{-6}$ y $3.37e^{-2}$cm.s.
- La frecuencia esquina (fc) varía entre 0.40 y 6.75Hz.

7.5.4. Estación Bella Unión

La estación Bella Unión ubicada en la provincia de Caravelí, departamento de Arequipa, registró 116 réplicas se muestran dos espectros representativos en la Figura 7.6 siendo sus características espectrales las siguientes:

- La parte plana del espectro (Ω), varía en un rango comprendido entre $2e^{-6}$ y $4.4e^{-2}$cm.s.
- La frecuencia esquina (fc) varía entre 0.5 y 7Hz.

7.5.5. Estación Quilca

La estación Quilca ubicada en la provincia de Camaná, departamento de Arequipa, registró 35 se muestran dos espectros representativos (Réplica número 20 y la 14) en la Figura 7.7 siendo sus características espectrales las siguientes:

- La parte plana del espectro (Ω), varía en un rango comprendido entre $4e^{-6}$ y $3e^{-2}$cm.s.
- La frecuencia esquina (fc) varía entre 0.29 y 6.1Hz.

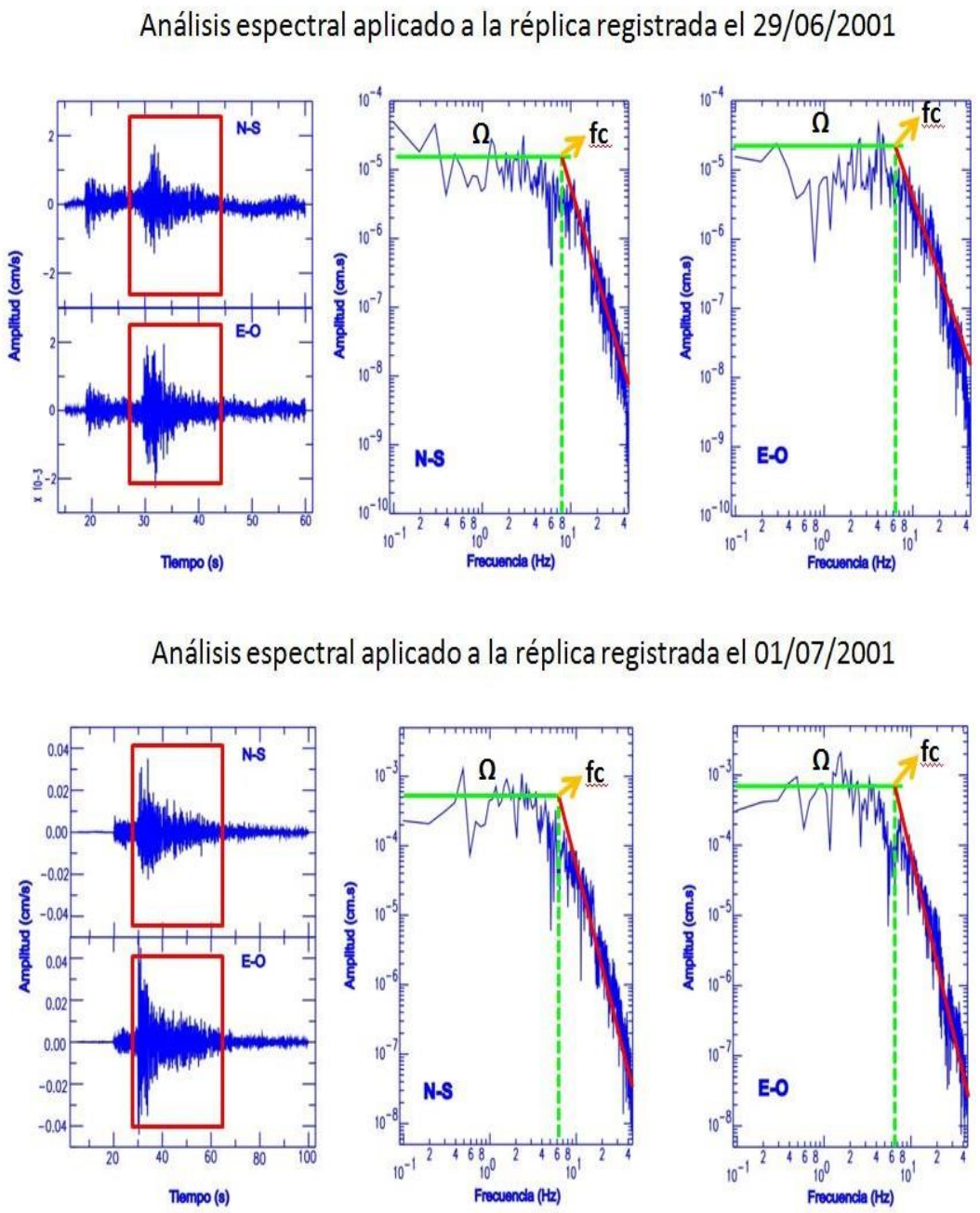


Figura 7.5. *Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Caravelí, N-S (Componente Norte-Sur) y E-O (Componente Este-Oeste).*

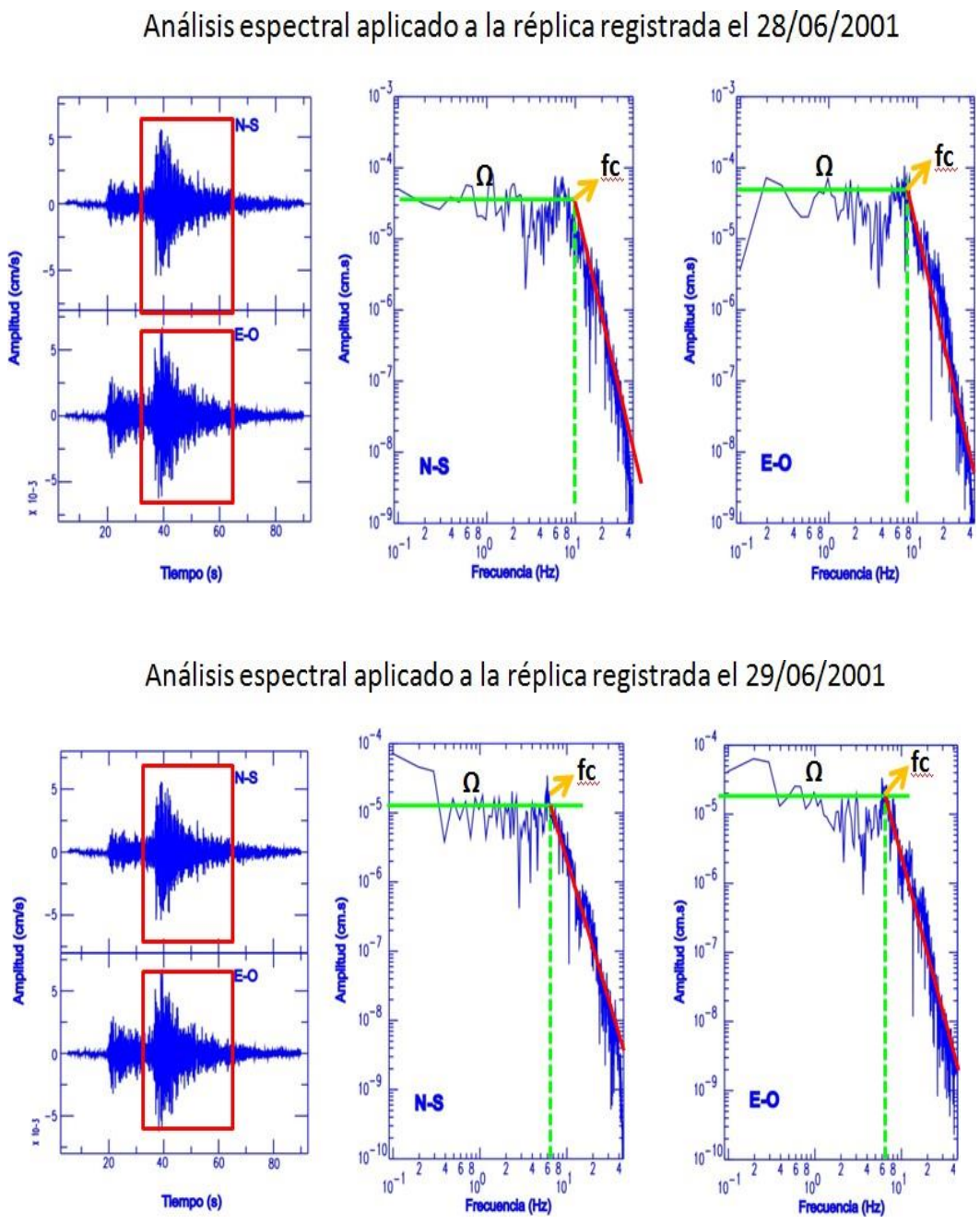


Figura 7.6. *Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Bella Unión, N-S (Componente Norte-Sur) y E-O (Componente Este-Oeste).*

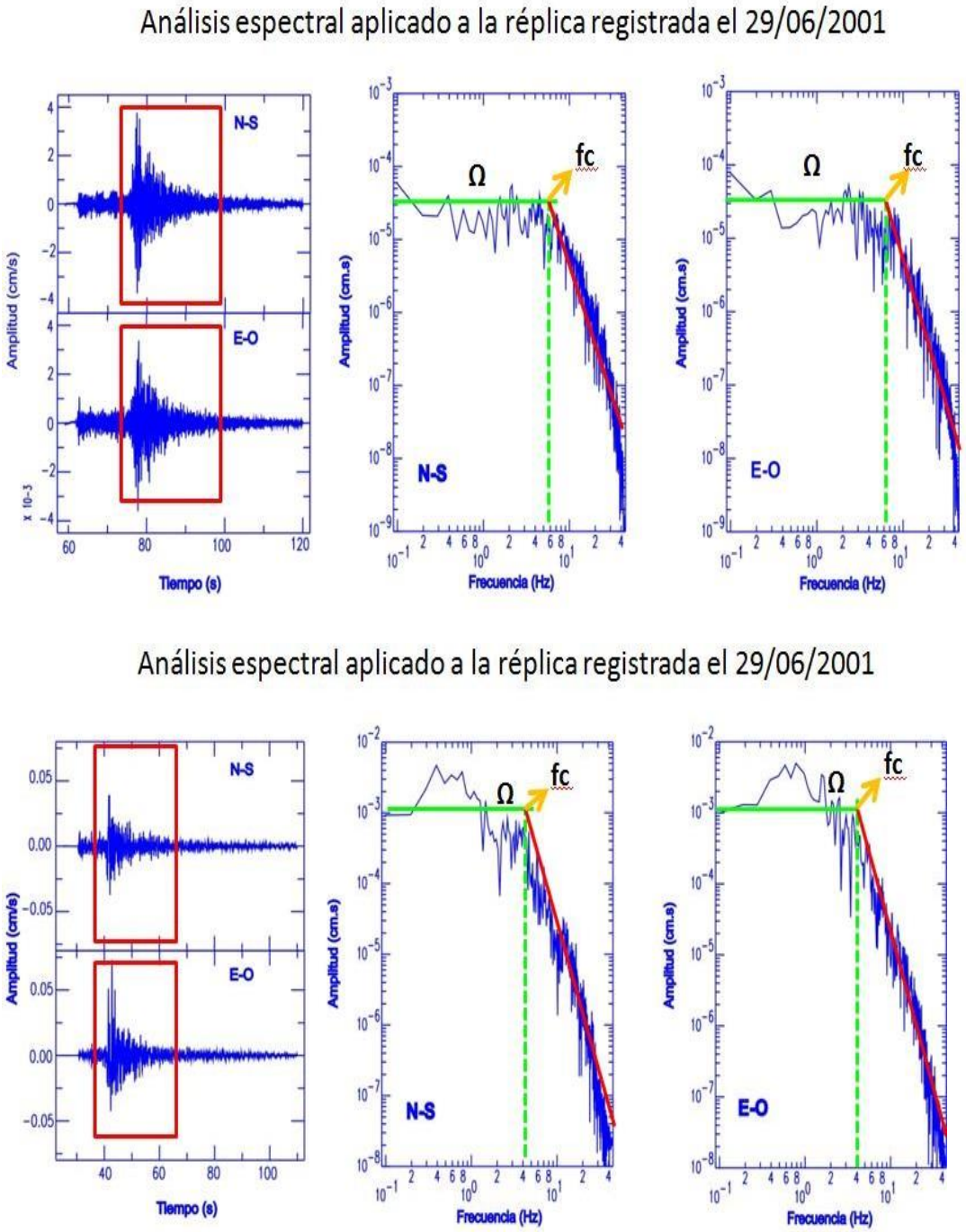


Figura 7.7. *Ejemplos de espectros de ondas S para el desplazamiento del suelo correspondiente a réplicas registradas en la estación Quilca, N-S (Componente Norte- Sur) y E-O (Componente Este-Oeste).*

En la Tabla 7.3 se presentan la lista de las 235 réplicas registradas en la estación Tocota, para las cuales se ha elaborado los espectros de desplazamiento, también se presenta sus parámetros hipocentrales como epicentros, profundidad del foco y Magnitud Local, además los parámetros evaluados como momento sísmico, radio, caída de esfuerzos, Magnitud Momento (Mw) y Magnitud Energía (Me). Las tablas con los parámetros de la fuente sísmica obtenidos para las estaciones Ocoña, Caravelí, Bella Unión y Quilca se presentan en el Anexo 1, en el Anexo 2 se consideran treinta espectros de desplazamiento representativos para cada una de las estaciones sísmicas.

Tabla 7.3. *Parámetros de la fuente sísmica de réplicas de la estación Tocota.*

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
1	28/06/01	04:24:46	-16.916	-73.972	9.7	4.2	4.59E+15	0.37	39.83	4.44	4.09
2	28/06/01	05:13:26	-16.777	-73.990	9.6	3.4	1.96E+14	0.36	1.84	3.53	3.74
3	28/06/01	07:50:49	-16.353	-73.836	5.6	2.9	4.83E+13	0.27	1.02	3.12	3.58
4	28/06/01	08:25:07	-16.413	-73.684	21.3	3.0	3.18E+14	0.29	5.82	3.67	3.79
5	28/06/01	09:01:01	-16.009	-75.103	4.3	3.0	1.86E+13	0.33	0.23	2.85	3.47
6	28/06/01	12:05:21	-16.469	-73.288	59.5	3.0	6.39E+13	0.27	1.35	3.20	3.61
7	28/06/01	12:20:46	-15.877	-74.479	29.2	2.5	9.74E+13	0.36	0.91	3.33	3.66
8	28/06/01	19:13:28	-17.535	-71.921	10.2	3.1	4.58E+14	0.29	8.38	3.77	3.83
9	28/06/01	23:18:19	-16.529	-73.872	28.1	4.6	3.38E+14	0.38	2.61	3.69	3.80
10	29/06/01	00:07:30	-16.344	-74.001	6.6	3.0	3.01E+14	0.25	8.39	3.65	3.78
11	29/06/01	00:21:43	-16.387	-73.916	8.9	3.3	1.04E+14	0.32	1.38	3.34	3.66
12	29/06/01	06:03:30	-16.399	-73.465	33.1	2.8	1.03E+14	0.32	1.37	3.34	3.66
13	29/06/01	06:16:56	-16.439	-73.389	36.2	3.1	2.87E+13	0.29	0.52	2.97	3.52
14	29/06/01	06:23:36	-16.466	-73.651	18.4	2.9	6.77E+13	0.27	1.43	3.22	3.62
15	29/06/01	06:45:18	-17.101	-73.865	3.3	3.0	8.46E+14	0.41	5.31	3.95	3.90
16	29/06/01	07:10:34	-16.545	-73.653	34.8	3.7	5.26E+13	0.29	0.91	3.15	3.59
17	29/06/01	08:04:36	-16.976	-73.705	9.9	2.8	5.98E+13	0.36	0.56	3.18	3.60
18	29/06/01	08:16:39	-16.795	-72.859	19.7	2.8	3.66E+13	0.27	0.78	3.04	3.55
19	29/06/01	08:42:59	-15.384	-74.664	59.1	2.9	1.68E+13	0.24	0.53	2.82	3.46
20	29/06/01	10:27:03	-16.480	-73.528	21.5	2.8	1.62E+14	0.36	1.52	3.47	3.71
22	29/06/01	11:54:09	-16.369	-73.772	5.8	3.1	9.72E+14	0.25	27.07	3.99	3.91
23	29/06/01	11:57:58	-18.184	-71.710	13.7	2.8	3.52E+15	0.58	8.06	4.36	4.06
24	29/06/01	12:19:54	-16.406	-73.741	13.9	3.6	9.67E+13	0.24	3.06	3.32	3.66
25	29/06/01	14:36:23	-16.829	-72.928	18.6	2.8	4.09E+14	0.32	5.45	3.74	3.82
26	29/06/01	14:41:14	-17.125	-73.582	20.1	3.2	1.25E+14	0.35	1.26	3.40	3.68
28	29/06/01	16:35:52	-16.078	-74.569	13.8	2.8	1.31E+15	0.34	14.77	4.08	3.95
29	29/06/01	16:42:41	-16.480	-73.460	26.1	3.2	1.69E+14	0.24	5.35	3.49	3.72
30	29/06/01	16:58:42	-16.085	-74.549	19.8	4.8	1.23E+15	0.34	13.77	4.06	3.94
31	29/06/01	18:01:59	-16.526	-73.498	30.1	2.7	3.77E+14	0.25	10.50	3.72	3.81

Tabla 7.3. *Continuación*

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
32	29/06/01	22:33:19	-18.448	-71.519	9.4	3.0	1.63E+17	4.12	1.03	5.48	4.47
33	29/06/01	22:56:07	-16.445	-73.641	20.0	4.3	3.35E+14	0.26	8.15	3.68	3.80
34	29/06/01	22:56:50	-16.308	-73.859	11.3	3.0	5.55E+14	0.32	7.41	3.83	3.85
37	30/06/01	02:02:02	-16.437	-73.388	39.3	3.1	1.76E+13	0.24	0.56	2.83	3.46
39	30/06/01	04:26:00	-17.188	-73.499	19.0	2.8	7.17E+13	0.34	0.81	3.24	3.62
40	30/06/01	05:05:57	-16.681	-73.304	26.9	2.8	9.51E+13	0.30	1.49	3.32	3.65
41	30/06/01	06:20:12	-16.380	-73.857	32.1	3.0	2.35E+13	0.23	0.84	2.91	3.49
42	30/06/01	07:43:14	-16.486	-73.526	24.2	3.1	3.71E+13	0.25	1.03	3.05	3.55
43	30/06/01	07:51:12	-16.693	-74.010	3.3	2.8	1.95E+14	0.36	1.83	3.53	3.74
44	30/06/01	08:34:48	-16.454	-73.555	13.9	2.8	1.05E+13	0.24	0.33	2.68	3.40
45	30/06/01	08:50:45	-16.933	-73.513	11.6	2.8	4.07E+13	0.34	0.46	3.07	3.56
46	30/06/01	11:11:00	-16.448	-73.682	24.8	3.2	5.05E+13	0.25	1.40	3.14	3.58
47	30/06/01	11:32:25	-16.379	-73.847	23.4	3.0	9.15E+13	0.22	3.68	3.31	3.65
48	30/06/01	12:06:23	-16.817	-73.712	21.1	3.0	2.50E+14	0.35	2.62	3.60	3.76
49	30/06/01	13:46:14	-16.543	-73.641	34.0	3.0	4.21E+13	0.23	1.51	3.08	3.56
51	30/06/01	15:28:11	-17.210	-72.273	5.1	3.1	1.39E+14	0.25	3.86	3.43	3.70
52	30/06/01	16:31:30	-16.797	-72.955	25.8	2.7	9.42E+13	0.24	2.98	3.32	3.65
53	30/06/01	18:58:41	-16.405	-73.435	20.6	3.0	1.03E+14	0.23	3.67	3.34	3.66
54	30/06/01	19:27:06	-16.469	-73.414	17.3	3.0	6.96E+13	0.26	1.70	3.23	3.62
58	01/07/01	02:32:14	-15.825	-74.605	35.4	3.0	2.09E+13	0.22	0.84	2.88	3.48
59	01/07/01	06:26:14	-16.451	-73.579	49.5	3.9	2.12E+13	0.24	0.64	2.88	3.48
60	01/07/01	07:01:03	-16.474	-73.623	42.7	3.1	8.83E+13	0.28	1.72	3.30	3.65
61	01/07/01	07:40:45	-16.768	-73.789	12.1	3.9	2.68E+15	0.32	35.73	4.29	4.03
62	01/07/01	09:14:55	-15.937	-72.702	17.1	4.7	1.45E+14	0.28	2.81	3.44	3.70
63	01/07/01	09:24:02	-16.320	-74.022	14.5	2.7	9.82E+13	0.24	3.26	3.33	3.66
64	01/07/01	09:54:20	-16.476	-73.456	42.0	3.5	3.19E+13	0.26	0.82	3.00	3.53
65	01/07/01	10:13:10	-17.493	-72.285	28.1	3.8	1.87E+14	0.33	2.26	3.52	3.73
66	01/07/01	10:15:28	-16.534	-73.499	32.2	2.8	3.18E+13	0.24	1.00	3.00	3.53
68	01/07/01	11:06:28	-17.376	-73.427	0.7	3.3	1.58E+17	3.85	1.22	5.47	4.47
69	01/07/01	11:46:59	-16.080	-73.587	26.7	3.1	1.11E+14	0.28	2.30	3.36	3.67
70	01/07/01	12:16:57	-16.475	-73.481	0.2	3.0	7.38E+14	0.35	7.45	3.91	3.88
71	01/07/01	12:41:00	-16.332	-74.022	15.4	3.3	2.50E+15	0.48	9.89	4.27	4.02
72	01/07/01	12:59:33	-16.276	-74.079	46.9	3.2	8.67E+13	0.23	2.95	3.29	3.64
73	01/07/01	12:59:58	-16.210	-74.038	43.0	3.1	7.83E+13	0.26	1.91	3.26	3.63
74	01/07/01	13:03:47	-16.474	-73.477	38.6	3.9	2.34E+14	0.24	7.05	3.58	3.76
75	01/07/01	13:38:48	-16.341	-74.016	17.3	4.0	2.04E+14	0.28	3.96	3.54	3.74
76	01/07/01	14:52:44	-16.468	-73.806	46.8	3.0	8.31E+13	0.28	1.61	3.28	3.64
77	01/07/01	15:28:19	-16.344	-74.072	30.0	3.0	1.07E+15	0.30	16.75	4.02	3.92
78	01/07/01	15:31:03	-16.314	-71.578	34.9	3.1	1.71E+14	0.40	1.21	3.49	3.72
79	01/07/01	19:39:22	-16.718	-74.008	1.0	2.8	6.16E+13	0.24	2.05	3.19	3.60
81	01/07/01	21:32:53	-16.631	-70.672	24.9	2.7	3.10E+14	0.38	2.49	3.66	3.79
82	01/07/01	22:04:51	-16.492	-73.529	31.7	2.8	3.33E+13	0.29	0.61	3.02	3.53
85	02/07/01	02:49:57	-16.399	-73.929	11.2	3.0	2.10E+13	0.28	0.41	2.88	3.48
86	02/07/01	03:00:47	-17.103	-72.315	3.4	2.4	4.98E+14	0.28	9.67	3.80	3.84
87	02/07/01	03:07:02	-16.477	-73.389	39.2	3.1	2.14E+13	0.22	0.86	2.89	3.48
88	02/07/01	03:26:49	-16.529	-74.132	10.8	3.4	6.35E+13	0.31	0.94	3.20	3.61
89	02/07/01	03:56:58	-15.913	-73.738	55.7	2.8	5.29E+12	0.21	0.27	2.48	3.32
90	02/07/01	04:29:51	-16.466	-73.499	47.9	3.8	1.26E+13	0.23	0.49	2.73	3.42

Tabla 7.3. *Continuación*

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
91	02/07/01	05:09:27	-16.391	-73.862	9.0	3.2	1.68E+13	0.24	0.56	2.82	3.46
92	02/07/01	05:14:48	-15.922	-74.477	27.4	3.0	3.44E+12	0.23	0.13	2.36	3.27
93	02/07/01	05:29:58	-16.422	-73.531	4.0	2.5	1.78E+14	0.23	6.38	3.50	3.72
94	02/07/01	05:49:38	-16.817	-72.637	10.5	3.2	1.48E+14	0.29	2.72	3.45	3.70
95	02/07/01	06:40:25	-16.297	-73.836	39.3	3.0	6.05E+13	0.24	2.01	3.19	3.60
96	02/07/01	07:40:42	-17.316	-72.803	5.1	3.3	2.74E+14	0.31	4.03	3.62	3.77
97	02/07/01	09:00:40	-16.812	-72.559	9.5	2.9	8.90E+13	0.31	1.31	3.30	3.65
98	02/07/01	09:25:02	-15.878	-72.700	10.5	3.3	2.05E+14	0.23	7.31	3.54	3.74
99	02/07/01	09:49:34	-16.366	-73.629	30.3	3.1	1.29E+14	0.23	4.38	3.41	3.69
100	02/07/01	11:59:19	-15.218	-74.048	0.5	2.9	2.25E+13	0.25	0.64	2.90	3.49
101	02/07/01	14:07:33	-16.509	-73.661	42.1	3.3	2.38E+14	0.30	3.85	3.58	3.76
102	02/07/01	14:38:30	-16.503	-73.667	47.0	3.6	1.72E+14	0.21	8.30	3.49	3.72
103	02/07/01	18:23:32	-16.329	-73.614	14.3	3.0	2.05E+14	0.23	6.99	3.54	3.74
104	02/07/01	18:31:56	-16.795	-74.050	16.0	2.8	1.49E+14	0.21	7.51	3.45	3.70
105	02/07/01	20:08:24	-15.267	-74.824	57.3	2.9	6.38E+12	0.23	0.23	2.54	3.34
106	02/07/01	20:47:21	-16.512	-73.486	32.7	3.2	2.05E+13	0.26	0.50	2.87	3.48
107	02/07/01	22:05:40	-16.618	-73.276	41.0	3.0	6.84E+13	0.24	2.16	3.22	3.62
112	03/07/01	03:35:05	-16.517	-73.728	41.5	3.3	2.04E+13	0.22	0.82	2.87	3.48
113	03/07/01	03:58:10	-16.525	-73.666	25.4	3.5	1.08E+14	0.31	1.64	3.35	3.67
114	03/07/01	04:06:25	-16.468	-73.558	28.2	2.7	8.71E+13	0.25	2.49	3.29	3.64
115	03/07/01	04:38:39	-16.333	-73.707	15.2	3.6	4.57E+13	0.20	2.55	3.11	3.57
116	03/07/01	05:12:57	-16.515	-73.444	36.2	3.2	2.60E+13	0.23	1.00	2.94	3.51
119	03/07/01	06:54:13	-17.116	-72.870	11.9	3.3	1.38E+14	0.30	2.30	3.43	3.70
120	03/07/01	07:28:43	-16.533	-73.608	41.7	3.3	1.86E+13	0.24	0.59	2.85	3.47
121	03/07/01	07:32:12	-17.161	-71.936	10.0	3.2	9.14E+13	0.29	1.67	3.31	3.65
122	03/07/01	08:07:48	-16.485	-73.660	22.6	3.2	1.93E+13	0.26	0.47	2.86	3.47
123	03/07/01	08:31:32	-17.189	-72.761	24.3	3.3	4.73E+13	0.27	1.09	3.12	3.57
124	03/07/01	08:34:27	-16.108	-73.520	59.3	3.4	1.44E+13	0.20	0.75	2.77	3.44
125	03/07/01	08:52:54	-16.338	-73.856	13.6	2.9	5.81E+13	0.23	1.98	3.18	3.60
126	03/07/01	09:36:40	-16.573	-73.486	22.0	3.1	3.87E+13	0.23	1.42	3.06	3.55
127	03/07/01	12:47:04	-16.326	-72.083	34.5	2.7	1.70E+14	0.32	2.35	3.49	3.72
128	03/07/01	17:40:47	-17.028	-72.541	21.7	3.5	9.03E+13	0.26	2.20	3.30	3.65
129	03/07/01	18:57:23	-16.370	-73.988	7.7	2.8	5.23E+14	0.23	20.08	3.81	3.85
130	03/07/01	19:32:16	-16.273	-73.983	57.8	2.5	8.24E+13	0.21	4.14	3.28	3.64
131	03/07/01	21:32:50	-16.877	-74.064	1.4	2.5	2.12E+14	0.38	1.64	3.55	3.74
133	04/07/01	02:32:41	-16.955	-72.813	21.9	2.8	3.45E+13	0.24	1.09	3.03	3.54
134	04/07/01	02:59:21	-16.534	-73.423	32.3	2.8	9.08E+13	0.24	2.87	3.31	3.65
135	04/07/01	04:21:50	-16.267	-73.638	48.3	3.1	1.01E+13	0.21	0.49	2.67	3.40
136	04/07/01	04:54:16	-16.994	-72.819	10.0	2.7	1.47E+14	0.27	3.12	3.45	3.70
137	04/07/01	05:09:48	-16.534	-73.512	37.1	3.0	1.20E+13	0.21	0.54	2.72	3.42
138	04/07/01	05:25:19	-16.502	-73.378	40.5	2.8	1.43E+13	0.23	0.51	2.77	3.44
139	04/07/01	05:28:19	-16.124	-73.064	3.7	3.0	4.90E+13	0.21	2.46	3.13	3.58
140	04/07/01	05:59:04	-16.520	-73.542	30.5	2.9	1.38E+13	0.21	0.69	2.76	3.43
141	04/07/01	06:01:18	-16.446	-73.357	34.9	3.2	1.30E+13	0.24	0.41	2.74	3.43
142	04/07/01	06:20:12	-16.542	-73.661	22.1	3.4	1.89E+13	0.24	0.60	2.85	3.47
143	04/07/01	07:49:58	-16.526	-73.688	30.8	2.9	6.49E+13	0.22	2.61	3.21	3.61
144	04/07/01	08:09:45	-16.191	-74.627	17.2	2.8	1.68E+13	0.27	0.36	2.82	3.46
148	04/07/01	10:38:57	-16.032	-72.786	7.9	3.0	2.56E+14	0.26	6.76	3.61	3.77

Tabla 7.3. *Continuación*

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
149	04/07/01	11:44:41	-16.451	-73.749	15.5	3.5	1.77E+14	0.22	7.13	3.50	3.72
150	04/07/01	13:02:28	-15.815	-72.834	8.1	3.5	1.38E+14	0.21	6.63	3.43	3.70
151	04/07/01	13:48:24	-16.945	-72.881	0.0	3.0	4.61E+13	0.26	1.18	3.11	3.57
152	04/07/01	17:19:04	-16.555	-73.781	16.3	3.8	7.65E+13	0.32	1.02	3.26	3.63
153	04/07/01	17:22:07	-15.878	-73.062	19.4	3.5	7.73E+13	0.21	3.88	3.26	3.63
154	04/07/01	17:36:15	-17.131	-73.320	19.9	3.2	2.66E+14	0.27	5.65	3.62	3.77
155	04/07/01	18:10:06	-16.450	-73.713	22.5	3.0	7.17E+13	0.21	3.23	3.24	3.62
156	04/07/01	19:08:32	-16.939	-72.853	14.7	3.0	2.33E+14	0.29	4.01	3.58	3.75
157	04/07/01	20:55:25	-16.343	-74.067	16.4	2.8	3.04E+13	0.22	1.25	2.99	3.52
158	04/07/01	20:59:40	-15.421	-72.898	8.2	3.0	1.15E+14	0.23	3.91	3.37	3.68
159	04/07/01	22:02:19	-16.502	-73.761	22.6	3.1	2.42E+14	0.23	8.65	3.59	3.76
163	05/07/01	02:38:48	-16.369	-73.532	32.9	3.6	1.65E+14	0.21	7.45	3.48	3.72
164	05/07/01	02:54:32	-16.593	-72.928	55.1	3.5	1.59E+13	0.24	0.48	2.80	3.45
165	05/07/01	03:22:54	-16.405	-73.596	47.3	3.3	2.59E+13	0.21	1.16	2.94	3.51
166	05/07/01	03:58:19	-16.586	-73.448	21.8	3.5	2.49E+13	0.23	0.89	2.93	3.50
167	05/07/01	04:26:59	-16.499	-73.567	21.2	3.3	5.85E+13	0.23	2.09	3.18	3.60
168	05/07/01	04:54:23	-16.955	-72.903	16.6	3.0	4.09E+13	0.26	1.02	3.07	3.56
169	05/07/01	05:26:42	-16.325	-73.739	17.6	3.3	1.12E+14	0.21	5.60	3.37	3.67
170	05/07/01	05:41:13	-17.144	-73.302	12.0	2.7	1.22E+14	0.27	2.82	3.39	3.68
173	05/07/01	08:19:31	-16.429	-73.113	42.9	2.8	2.83E+14	0.24	8.96	3.63	3.78
174	05/07/01	08:38:48	-16.345	-73.976	11.7	3.0	1.63E+14	0.25	4.54	3.48	3.71
176	05/07/01	15:23:56	-16.135	-73.748	56.8	3.2	2.82E+14	0.21	14.16	3.63	3.78
177	05/07/01	15:31:21	-16.377	-73.777	24.6	3.1	1.98E+14	0.22	7.97	3.53	3.74
178	05/07/01	16:44:09	-16.489	-73.633	47.2	3.7	5.23E+14	0.20	29.16	3.81	3.85
179	05/07/01	17:18:14	-16.494	-73.228	40.5	2.7	1.26E+13	0.20	0.75	2.73	3.42
180	05/07/01	18:09:06	-17.026	-72.746	18.8	4.1	1.24E+15	0.26	30.29	4.06	3.94
181	05/07/01	19:31:38	-16.447	-73.476	29.0	3.0	1.71E+13	0.22	0.73	2.82	3.46
183	05/07/01	22:02:40	-16.474	-73.558	19.6	3.6	5.68E+13	0.25	1.58	3.17	3.60
184	05/07/01	22:43:16	-16.431	-73.601	17.7	3.2	5.33E+13	0.24	1.69	3.15	3.59
194	06/07/01	02:29:14	-16.355	-73.588	56.0	3.3	2.29E+13	0.21	1.03	2.91	3.49
195	06/07/01	02:54:04	-16.574	-73.591	27.2	3.2	6.92E+13	0.21	3.12	3.23	3.62
196	06/07/01	03:11:49	-16.507	-73.666	31.2	3.1	1.99E+13	0.24	0.63	2.87	3.48
197	06/07/01	03:41:41	-16.978	-73.569	15.4	4.5	4.09E+13	0.33	0.49	3.07	3.56
198	06/07/01	03:58:10	-16.573	-73.698	21.0	2.9	8.72E+13	0.26	2.13	3.29	3.64
199	06/07/01	05:01:50	-15.474	-72.833	7.4	3.9	3.11E+13	0.24	0.98	2.99	3.53
200	06/07/01	06:29:47	-16.350	-73.891	10.8	3.0	2.29E+13	0.21	1.08	2.91	3.49
201	06/07/01	06:59:39	-15.682	-73.432	13.6	3.4	9.15E+12	0.22	0.37	2.64	3.39
202	06/07/01	08:08:34	-16.469	-73.566	27.8	3.1	2.29E+13	0.24	0.72	2.91	3.49
203	06/07/01	08:12:25	-16.573	-73.543	27.5	2.9	1.88E+14	0.24	5.67	3.52	3.73
205	06/07/01	08:31:36	-16.596	-74.158	10.6	2.8	1.08E+14	0.29	1.98	3.36	3.67
206	06/07/01	08:41:09	-17.969	-71.521	30.6	3.0	1.99E+14	0.29	3.64	3.53	3.74
207	06/07/01	08:48:29	-16.800	-73.629	41.4	3.5	8.31E+12	0.21	0.37	2.61	3.38
208	06/07/01	09:22:00	-16.441	-73.551	30.0	3.0	2.98E+15	0.26	72.59	4.32	4.04
209	06/07/01	09:54:37	-16.483	-73.476	29.0	3.3	3.96E+13	0.21	1.99	3.07	3.55
210	06/07/01	12:11:55	-16.965	-72.562	32.2	3.5	4.96E+13	0.27	1.08	3.13	3.58
211	06/07/01	13:11:16	-16.468	-73.515	29.0	3.1	3.69E+13	0.21	1.66	3.04	3.55
212	06/07/01	14:50:00	-16.488	-73.741	25.8	3.0	3.07E+13	0.21	1.54	2.99	3.53
213	06/07/01	15:16:18	-16.858	-73.925	10.1	3.4	3.31E+13	0.38	0.26	3.01	3.53

Tabla 7.3. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
214	06/07/01	15:26:59	-16.445	-73.583	18.7	3.4	3.41E+13	0.20	1.90	3.02	3.54
218	06/07/01	19:59:51	-17.165	-73.417	14.0	3.0	7.60E+13	0.31	1.08	3.25	3.63
219	06/07/01	20:49:16	-16.430	-73.654	16.5	3.6	5.80E+13	0.23	2.23	3.18	3.60
220	06/07/01	22:29:25	-16.489	-73.557	21.4	3.3	4.76E+13	0.23	1.62	3.12	3.58
222	07/07/01	02:48:03	-17.027	-72.654	17.0	3.3	9.14E+13	0.26	2.23	3.31	3.65
223	07/07/01	02:58:30	-16.306	-73.876	13.1	3.3	6.36E+13	0.21	2.86	3.20	3.61
224	07/07/01	03:10:54	-16.857	-73.792	14.1	4.8	1.78E+14	0.32	2.38	3.50	3.72
226	07/07/01	05:05:43	-16.381	-73.612	41.4	4.3	1.76E+13	0.21	0.89	2.83	3.46
227	07/07/01	05:19:43	-16.414	-73.878	22.7	3.9	2.33E+15	0.29	42.61	4.24	4.01
228	07/07/01	05:28:39	-17.083	-72.866	8.9	4.0	6.74E+13	0.28	1.31	3.22	3.61
229	07/07/01	06:51:56	-15.549	-72.688	10.0	3.9	6.07E+13	0.21	2.73	3.19	3.60
230	07/07/01	07:47:23	-16.427	-73.389	48.5	3.8	1.14E+14	0.21	5.70	3.37	3.67
231	07/07/01	07:50:04	-16.454	-73.624	32.7	2.7	1.53E+14	0.22	6.15	3.46	3.71
233	07/07/01	11:49:24	-16.338	-71.689	32.9	3.1	9.74E+14	0.32	13.00	3.99	3.91
234	07/07/01	11:55:59	-16.683	-71.466	12.2	4.1	1.34E+15	0.24	40.16	4.08	3.95
236	07/07/01	13:36:18	-17.826	-72.082	23.6	4.4	3.83E+14	0.23	13.68	3.72	3.81
237	07/07/01	15:24:17	-17.780	-72.165	15.5	3.8	4.94E+14	0.32	6.59	3.80	3.84
238	07/07/01	15:31:27	-16.049	-74.415	39.0	4.2	1.15E+13	0.25	0.33	2.71	3.41
240	07/07/01	16:22:30	-16.230	-73.610	44.4	3.6	9.74E+13	0.22	3.92	3.33	3.66
241	07/07/01	17:04:20	-18.037	-72.247	10.7	3.3	4.75E+14	0.38	3.82	3.78	3.83
242	07/07/01	17:37:28	-16.404	-71.702	5.3	3.6	4.31E+14	0.37	3.74	3.76	3.82
243	07/07/01	19:29:55	-17.877	-72.225	2.9	4.0	1.08E+15	0.37	9.39	4.02	3.93
244	07/07/01	21:24:54	-17.794	-72.153	12.7	3.3	7.45E+14	0.27	15.79	3.91	3.88
245	07/07/01	21:27:34	-17.589	-71.790	19.5	3.7	1.30E+15	0.32	17.28	4.07	3.95
246	07/07/01	22:15:10	-16.942	-71.347	30.1	3.9	1.70E+14	0.27	3.61	3.49	3.72
247	08/07/01	00:15:13	-16.483	-73.524	37.0	3.5	1.44E+13	0.19	0.89	2.77	3.44
248	08/07/01	01:25:26	-16.524	-73.490	24.5	2.8	1.00E+14	0.20	5.60	3.33	3.66
249	08/07/01	01:38:41	-16.799	-71.692	30.8	2.8	4.22E+13	0.25	1.20	3.08	3.56
250	08/07/01	02:51:36	-13.500	-72.398	1.9	2.9	1.38E+14	0.32	1.84	3.43	3.70
251	08/07/01	03:56:57	-14.550	-73.729	24.2	3.0	4.94E+13	0.21	2.22	3.13	3.58
252	08/07/01	04:09:34	-17.694	-72.389	28.5	3.6	6.88E+14	0.32	9.19	3.89	3.88
253	08/07/01	05:27:48	-16.345	-71.272	18.5	3.6	3.54E+14	0.24	11.78	3.70	3.80
254	08/07/01	05:49:28	-15.943	-71.841	46.2	3.5	1.65E+14	0.26	4.03	3.48	3.72
255	08/07/01	06:39:43	-16.465	-73.153	42.2	3.9	4.65E+13	0.21	2.33	3.11	3.57
256	08/07/01	07:07:30	-16.480	-73.523	41.8	3.1	6.13E+13	0.21	2.76	3.19	3.60
257	08/07/01	07:48:32	-16.332	-73.296	39.8	4.2	1.42E+13	0.20	0.79	2.77	3.44
259	08/07/01	08:23:06	-14.539	-71.468	19.1	2.9	1.44E+14	0.29	2.63	3.44	3.70
260	08/07/01	09:09:31	-16.128	-73.814	46.2	3.7	1.18E+13	0.20	0.66	2.72	3.42
261	08/07/01	09:19:31	-17.503	-71.838	38.0	3.2	3.79E+14	0.29	6.93	3.72	3.81
265	08/07/01	11:28:25	-16.765	-73.839	4.8	3.7	4.56E+14	0.27	10.52	3.77	3.83
266	08/07/01	11:42:20	-15.695	-75.067	5.2	3.3	1.68E+14	0.32	2.25	3.48	3.72
267	08/07/01	11:52:24	-15.113	-75.126	50.6	3.3	1.62E+13	0.20	0.96	2.81	3.45
268	08/07/01	20:03:24	-17.414	-72.064	29.2	3.4	1.55E+15	0.40	11.01	4.13	3.97
269	08/07/01	21:15:21	-16.840	-72.690	10.6	2.7	2.90E+15	0.30	45.45	4.31	4.03
270	08/07/01	23:32:23	-16.492	-73.474	44.7	2.8	2.08E+14	0.20	10.89	3.54	3.74
271	09/07/01	02:39:14	-16.886	-72.646	13.3	2.8	1.64E+14	0.26	3.98	3.48	3.72
272	09/07/01	02:43:13	-16.995	-72.735	41.6	3.7	8.35E+13	0.29	1.44	3.28	3.64
273	09/07/01	05:37:56	-16.132	-74.379	18.3	5.5	6.64E+12	0.21	0.33	2.55	3.35

Tabla 7.3. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
274	09/07/01	06:07:09	-16.321	-73.728	12.9	3.6	5.48E+13	0.20	2.93	3.16	3.59
275	09/07/01	09:53:04	-16.289	-74.065	10.6	3.2	2.29E+13	0.23	0.82	2.91	3.49
277	09/07/01	14:59:06	-16.889	-72.199	3.1	2.9	1.30E+15	0.29	23.71	4.07	3.95
278	09/07/01	17:56:39	-16.453	-73.498	28.3	3.5	1.47E+14	0.25	4.09	3.44	3.70
279	09/07/01	19:05:17	-17.625	-71.993	23.4	3.8	4.96E+14	0.28	9.93	3.80	3.84
280	09/07/01	23:09:08	-16.842	-73.105	47.4	2.8	2.98E+13	0.27	0.63	2.98	3.52
284	10/07/01	05:14:00	-17.766	-72.249	5.3	2.9	2.41E+14	0.36	2.26	3.59	3.76
286	10/07/01	17:18:59	-16.579	-73.520	32.6	3.1	7.25E+13	0.23	2.65	3.24	3.62
287	10/07/01	17:35:40	-16.481	-73.516	40.0	3.5	2.30E+14	0.22	10.12	3.57	3.75
288	10/07/01	21:33:16	-16.037	-72.819	11.0	3.8	1.05E+15	0.21	52.75	4.01	3.92
289	11/07/01	01:28:02	-16.419	-72.768	20.3	3.2	8.16E+13	0.19	5.04	3.27	3.64
290	11/07/01	06:10:00	-17.951	-71.813	2.8	3.1	8.81E+14	0.41	5.53	3.96	3.90
291	11/07/01	07:08:06	-16.598	-72.753	27.6	3.2	8.31E+13	0.22	3.58	3.28	3.64
292	11/07/01	09:08:53	-16.628	-74.024	7.0	3.0	9.08E+13	0.31	1.38	3.31	3.65

7.6. MOMENTO SÍSMICO VS RADIO DE LA FRACTURA

7.6.1. Estación Tocota

Para analizar el Momento sísmico (Mo) en función del radio de fractura (r) se ha construido el diagrama de caída de esfuerzos, mostrado en la Figura 7.8.

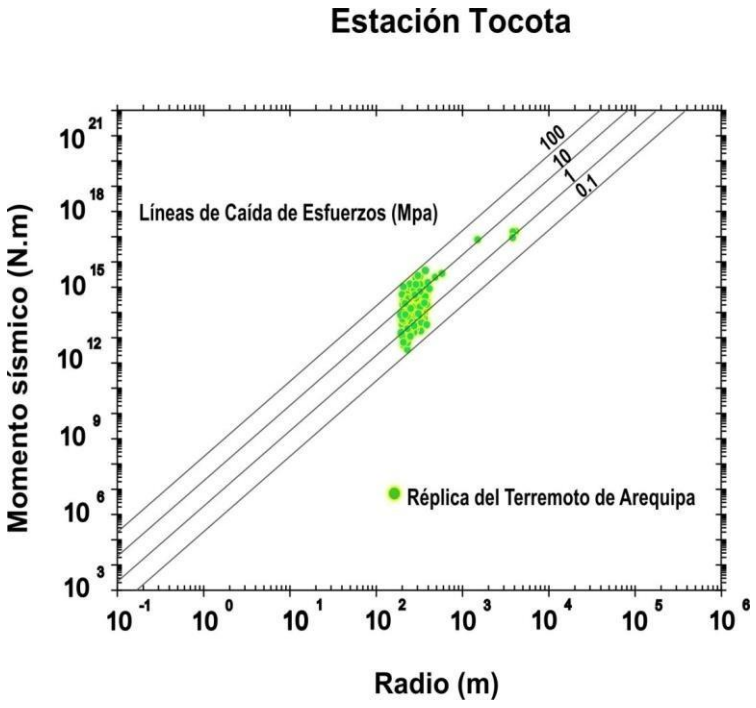


Figura 7.8. *Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Tocota.*

En la Figura 7.8 se ha representado el esfuerzo medio aparente con las líneas de 0.1, 1, 10 y 100MPa (Kanamori y Anderson, 1975). Se observa que el mayor número de réplicas presentan valores de caída de esfuerzos entre 0.1 y 100Mpa, similares a valores obtenidos para réplicas y microsismicidad (Abercrombie y Leary, 1993). Para la estación Tocota, la variación de los valores de Momento sísmico escalar (Mo), radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento (Mw) y Magnitud energía (Me) se presentan en la Tabla 7.4. Se consideran los dos decimales para analizar la variación de los parámetros de la fuente con detalle.

Tabla 7.4. *Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas registradas en la estación Tocota.*

Momento sísmico (N.m)	Radio de fractura (m)	Caída de esfuerzos (Mpa)	Magnitud Momento (Mw)	Magnitud Energía (Me)
$3.45x10^{12}$ - $1.63x10^{17}$	190-4122	0.13-72.59	2.36-5.48	3.27-4.47

7.6.2. Estación Ocoña

Para analizar el Momento sísmico (Mo) en función del radio de fractura se ha construido la correlación mostrada en la Figura 7.9.

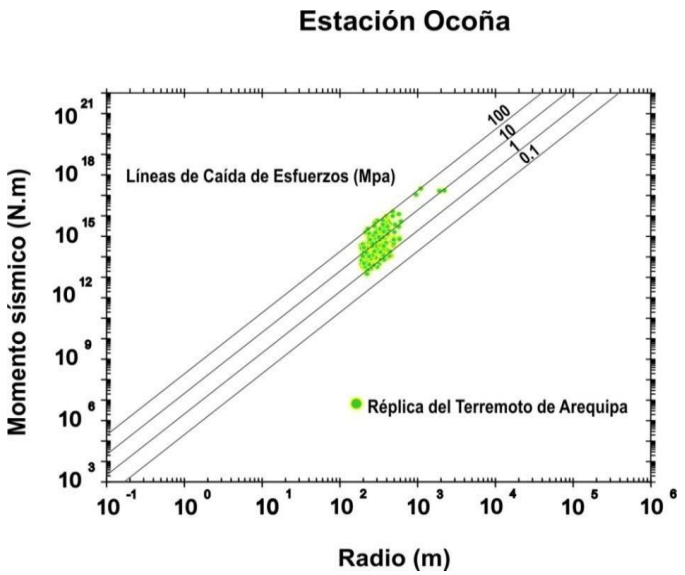


Figura 7.9*. Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Ocoña.*

En la Figura 7.9 se ha representado el esfuerzo medio aparente con las líneas de 0.1, 1, 10 y 100MPa (Kanamori y Anderson, 1975). Se observa que el mayor número de réplicas presentan valores de caída de esfuerzos entre 0.1 y 100Mpa, similares a valores obtenidos para réplicas, emjambres y microsismicidad (Abercrombie y Leary, 1993).

Para la estación Ocoña, la variación de los valores de Momento sísmico escalar (Mo), radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento (Mw) y Magnitud energía (Me) se presentan en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5. *Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas de la estación Ocoña.*

Momento sísmico (N.m)	Radio de fractura (m)	Caída de esfuerzos (Mpa)	Magnitud Momento (Mw)	Magnitud Energía (Me)
$1.39x10^{13}$ - $1.63x10^{17}$	190-2220	0.48-86.65	2.76-5.47	3.43-4.47

7.6.3. Estación Caravelí

Para analizar el Momento sísmico (Mo) en función del radio de fractura se ha construido la correlación mostrada en la Figura 7.10.

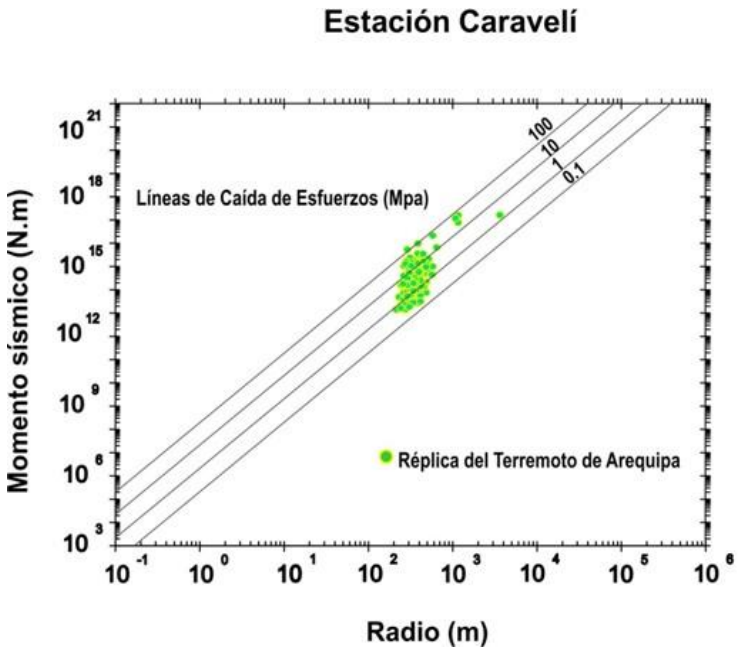


Figura 7.10. *Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Caravelí.*

En la Figura 7.10 se ha representado el esfuerzo medio aparente con las líneas de 0.1, 1, 10 y 100MPa (Kanamori y Anderson, 1975). Se observa que el mayor número de réplicas presentan valores de caída de esfuerzos entre 0.1 y 100Mpa, similares a valores obtenidos para réplicas, emjambres y microsismicidad (Abercrombie y Leary, 1993). Para la estación Caravelí, la variación de los valores de Momento sísmico escalar (Mo), radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento (Mw) y Magnitud energía (Me) se presentan en la Tabla 7.6.

Tabla 7.6. *Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas de la estación Caravelí.*

Momento sísmico (N.m)	Radio de fractura (m)	Caída de esfuerzos (Mpa)	Magnitud Momento (Mw)	Magnitud Energía (Me)
$1.35x10^{13}$ - $1.63x10^{17}$	210-3610	0.20-98.76	2.75-5.48	3.43-4.47

7.6.4. Estación Bella Unión

Para analizar el Momento sísmico (Mo) en función del radio de fractura se ha construido la correlación mostrada en la Figura 7.11.

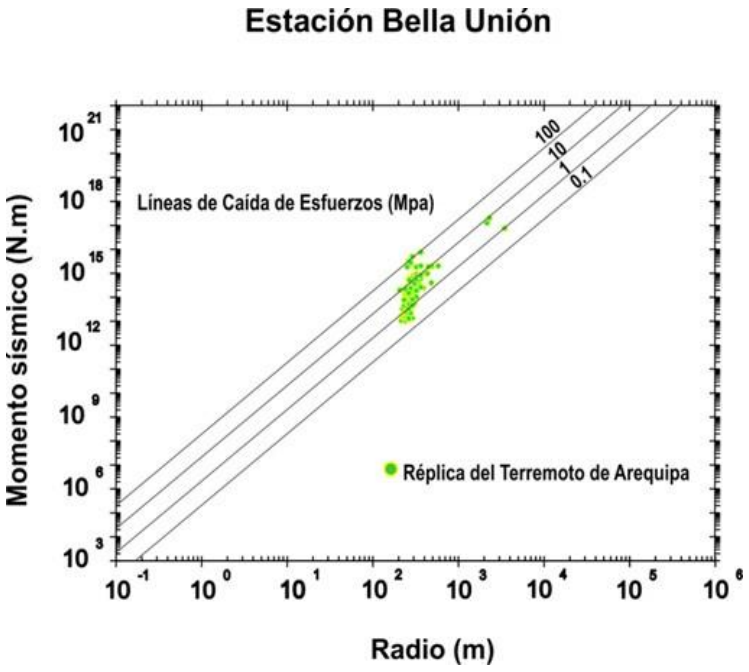


Figura 7.11. *Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Bella Unión.*

En la Figura 7.11 se ha representado el esfuerzo medio aparente con las líneas de 0.1, 1, 10 y 100MPa (Kanamori y Anderson, 1975). Se observa que el mayor número de réplicas presentan valores de caída de esfuerzos entre 0.1 y 100Mpa, similares a valores obtenidos para réplicas, emjambres y microsismicidad (Abercrombie y Leary, 1993).

Para la estación Bella Unión, la variación de los valores de Momento sísmico escalar (Mo), radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento (Mw) y Magnitud energía (Me) se presentan en la Tabla 7.7.

Tabla 7.7. *Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas de la estación Bella Unión.*

Momento sísmico (N.m)	Radio de fractura (m)	Caída de esfuerzos (Mpa)	Magnitud Momento (Mw)	Magnitud Energía (Me)
$1.04x10^{13} – 7.56x10^{15}$	210-580	0.25-90.94	2.68-4.59	3.40-4.14

7.6.5. Estación Quilca

Para analizar el Momento sísmico (Mo) en función del radio de fractura se ha construido la correlación mostrada en la Figura 7.12.

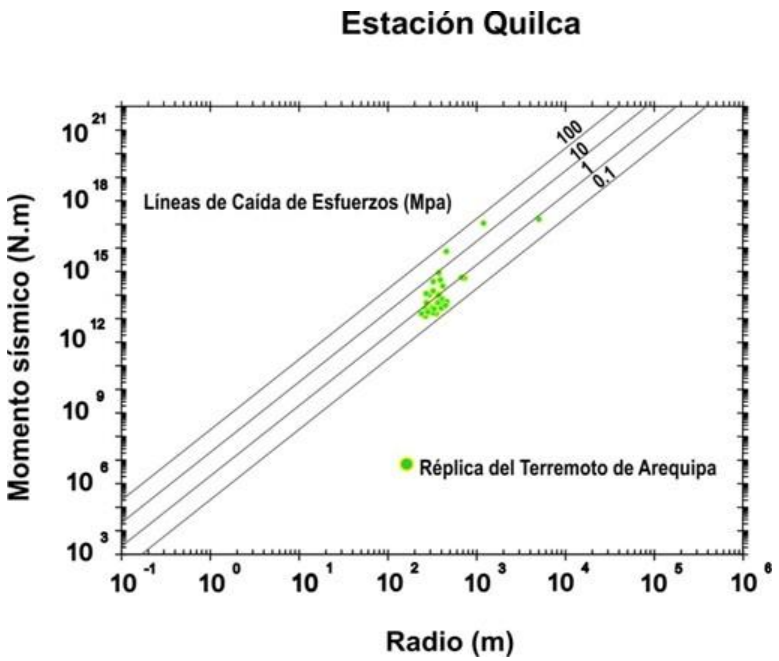


Figura 7.12. *Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Quilca.*

En la Figura 7.12 se ha representado el esfuerzo medio aparente con las líneas de 0.1, 1, 10 y 100MPa (Kanamori y Anderson, 1975). Se observa que el mayor número de réplicas presentan valores de caída de esfuerzos entre 0.1 y 100Mpa.

Para la estación Quilca, la variación de los valores de Momento sísmico escalar (Mo), radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento (Mw) y Magnitud energía (Me) se presentan en la Tabla 7.8.

Tabla 7.8. *Rangos de valores de momento sísmico, radio de fractura, caída de esfuerzos, Magnitud momento y Magnitud energía para réplicas de la estación Quilca.*

Momento sísmico (N.m)	Radio de fractura (m)	Caída de esfuerzos (Mpa)	Magnitud Momento (Mw)	Magnitud Energía (Me)
$1.25x10^{13}$ - $1.63x10^{17}$	240-4980	0.17-34.15	2.73-5.47	3.42-4.47

CAPÍTULO VIII

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

8.1. Interpretación

El objetivo principal del presente estudio es determinar los parámetros de la fuente sísmica de las réplicas del sismo de Arequipa del 2001, aplicando la técnica del análisis espectral. El paso más complejo en la aplicación de la técnica de análisis espectral, es la determinación correcta de las características del espectro sísmico; es decir, la parte plana (**Ω**) y la frecuencia esquina (fc), lo cual requiere de experiencia además de un buen conocimiento del modelo de la fuente sísmica y la escala del espectro sísmico. A pesar de la complejidad para resolver el problema de la fuente sísmica, el modelo de Brune para sismos con ML≤6 presenta características simples. El momento sísmico escalar es uno de los parámetros más importantes de la fuente sísmica (Aki, 1967), porque determina el tamaño del sismo, de allí que se pueda definir correctamente parámetros como Mo y $\Delta\sigma$. La cantidad de esfuerzos liberados durante un terremoto es una característica fundamental del proceso de ruptura. En concreto, la caída de esfuerzos representa la cantidad de esfuerzos actuantes que es empleado para producir el deslizamiento de la falla (Aki y Richards, 2002).

Los valores de caída de esfuerzos obtenidos en este estudio, varían en el rango de 0.1 a 100Mpa, siendo paradójico porque la mayoría de rocas resisten a esfuerzos de cizalla de hasta 200 a 280Mpa (Goodman, 1989); es decir dos órdenes de magnitud más que los obtenidos en este estudio. La explicación es que los esfuerzos corresponden a valores promedio siendo de

manera individual mayores o menores (Madariaga, 1994) y ello se debe a que las rupturas sísmicas son extremadamente complejas.

En este estudio se siguen los procedimientos y metodología de Kanamori y Anderson (1975), Tavera (1998) y Abercrombie y Leary (1993), estos investigadores analizaron la caída de esfuerzos para sismos de magnitud pequeña y moderada a mayor. En el desarrollo de la idea principal Kanamori y Anderson (1975), elaboraron un diagrama de caída de esfuerzos para más de 50 terremotos con magnitudes ≥ 6 Ms con epicentros en el Sur de California y el mundo (Figura 8.1), cuyos resultados sugieren que los valores promedio de caída de esfuerzos están comprendidos en el rango de 3 y 10Mpa, siendo un parámetro constante para sismos intraplaca e interplaca.

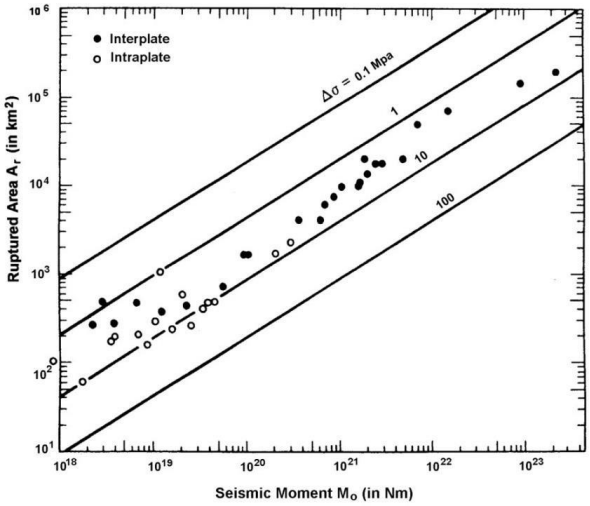


Figura 8.1. *Relación entre área de ruptura y momento sísmico. Las líneas 0.1, 1, 10 y 100MPa muestran una caída de esfuerzos (Δσ) constante, (Kanamori y Anderson, 1975).*

Asímismo Tavera, (1998) analizó la caída de esfuerzos de grandes terremotos con foco superficial, intermedio y profundo ocurridos en el Perú durante el periodo de 1980 a 1995 (Figura 8.2). En dicho estudio se determinó que los terremotos con foco a profundidad superficial, intermedia y profunda presentan valores de caída de esfuerzos que varían de 0.7Mpa a 10Mpa, similar a los valores obtenidos para otros terremotos ocurridos en América del Sur, resultados coherentes con los obtenidos por Kanamori y Anderson (1975).

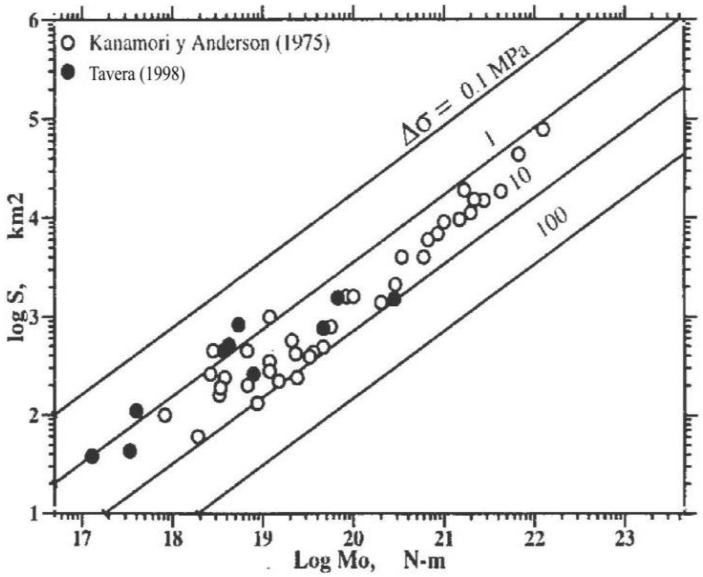


Figura 8.2. *Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar y el área de la fractura para terremotos con foco superficial, (Tavera, 1998).*

Otro de los estudios que ha analizado con detalle la variación de los valores de caída de esfuerzos para sismos de variada magnitud (1.5-7ML), es el de Abercrombie y Leary (1993). Estos autores realizaron la recopilación de 800 eventos sísmicos (Terremotos de mina, sismicidad volcánica e inducida, réplicas de grandes terremotos e hidrofracturas) con epicentros en California y el mundo, sus magnitudes son pequeñas, moderadas y grandes, esta recopilación considera sismos provenientes de varios estudios como se observa en la Figura 8.3.

a) Paso Cajón, son terremotos tectónicos más pequeños.
b) Terremotos de mina (Mc Garr et al., 1990)
c) Sismicidad Volcánica (Del Pezzo et al., 1987)
d) Terremotos de California (Thatcher y Hanks, 1973)
e) Lago Mammoth, eventos de California (Archuleta et al., 1982)
f) Terremotos grandes, incluye Michoacán 1985 (Heaton, 1990)
g) Sismicidad inducida (Gibowicz et al., 1991)
h) Terremotos de mina (Spotiswoode y Mc Garr, 1975)
i) Réplicas de Palm Spring, California (Mori y Frankel, 1990)
j) Terremotos de Los Ángeles (D. Dreger)

k) Réplicas de Loma Prieta (Guo et al., 1992)

l) Hidrofracturas (Fehler and Phillips, 1991)

m) Terremotos recientes (D. Wald, 1993).

El diagrama de caída de esfuerzos se presenta en la Figura 8.3, en el eje de las ordenadas está el momento sísmico escalar (M_0) sus unidades Newton.metro y en el eje de abcisas el radio de la fractura expresado en metros, las líneas en color negro indican el esfuerzo medio aparente corresponden a 0.1, 1, 10 y 100MPa, (Kanamori y Anderson, 1975).

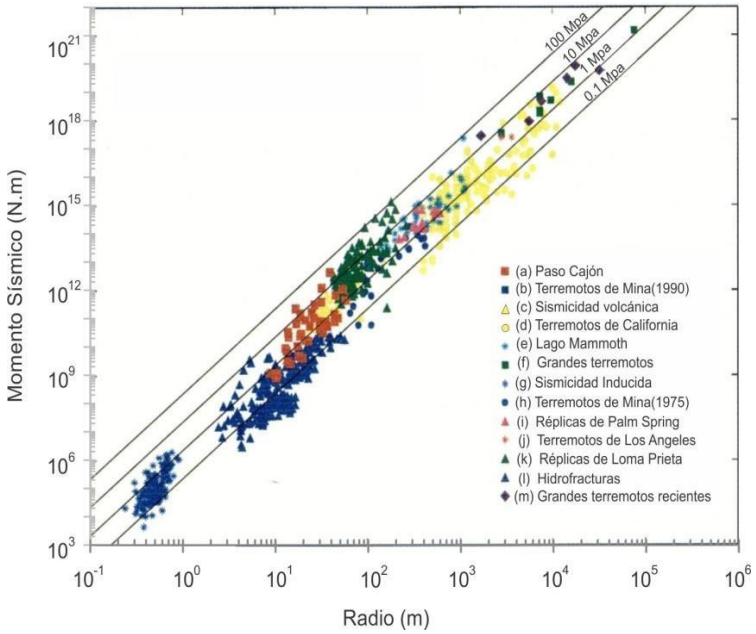


Figura 8.3. *Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), (Abercrombie y Leary, 1993).*

Según la Figura 8.3 los valores de caída de esfuerzos para los 800 sismos analizados varían en un rango de 0.1 a 100Mpa. En la Figura 8.4 se presenta los valores de caída de esfuerzos obtenidos para las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001 analizadas en cinco estaciones sísmicas por lo que se tiene la Figura 8.4.a) Estación Tocota, Figura 8.4.b) Estación Ocoña, Figura 8.4.c) Estación Caravelí, Figura 8.4.d) Estación Bella Unión y Figura 8.4.e) Estación Quilca, las réplicas del Terremoto de Arequipa analizadas están representadas por los círculos color verde claro y se ubican sobre los asteriscos color celeste que corresponden a las réplicas del Lago

Mammoth con magnitud 3.9≤ ML≤5.1 (Archuleta et al., 1982), los círculos amarillos representan los Terremotos de California con magnitud 3≤ML≤7 (Thatcher y Hanks, 1973), triángulos verdes que representan las réplicas de Loma Prieta 1.5≤ML≤4.5 (Guo et al., 1992) y los triángulos rosados que son las réplicas de Palm Spring, en California con magnitud 3.4≤ML≤4.4 (Mori y Frankel, 1990). En la Figura 8.4.a) están representadas las réplicas de la Estación Tocota, están delimitadas por la elipse roja y la mayoría de réplicas presentan valores de momento sísmico escalar dentro del rango de 10^{12} a 10^{15}N.m equivalente a una magnitud de 2.4-4.4Mw y el radio de la fractura varía de 190 a 500m, además se tienen dos réplicas que se encuentran aisladas, son las réplicas número 32 y 68 para ambas réplicas el radio de la fractura es del orden de 4000m y el momento sísmico escalar es del orden de 10^{17}N.m equivalente a una magnitud de 5.4Mw. Es importante señalar que el diagrama de caída de esfuerzos elaborado para la estación Tocota, se considera el diagrama de caída de esfuerzos representativo de la investigación debido a que los registros sísmicos de la estación Tocota tienen mejor calidad que las estaciones Ocoña, Caravelí, Bella Unión y Quilca.

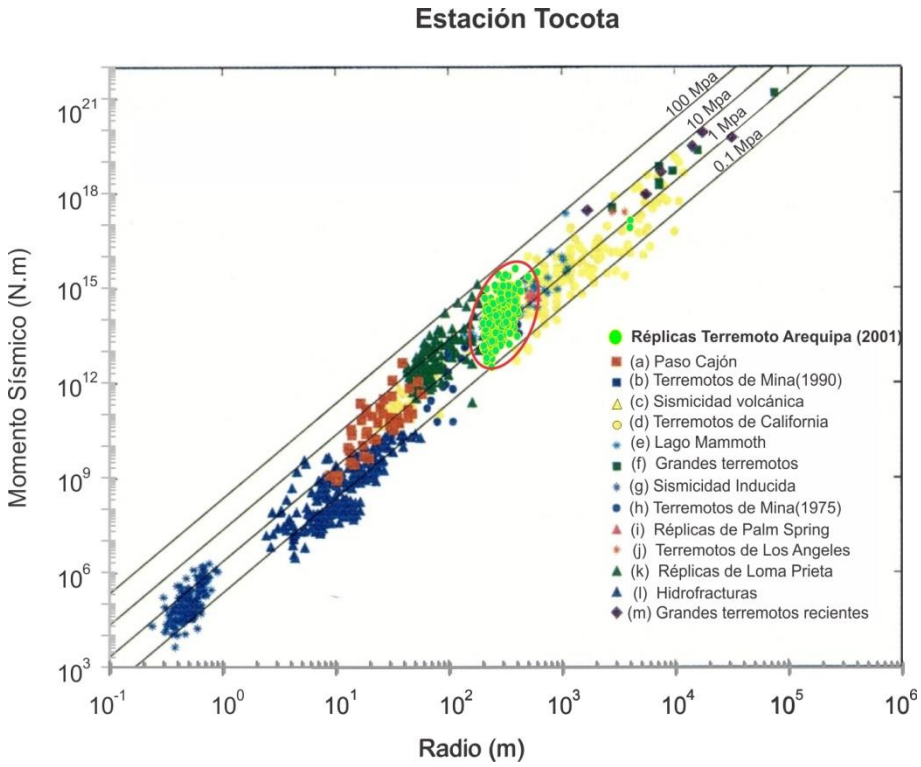


Figura 8.4.a) *Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Tocota. Modificado Abercrombie y Leary, (1993).*

La Figura 8.4.b) Estación Ocoña gráficamente muestra que los valores de momento sísmico escalar están en el rango de 10^{13} a 10^{16}N.m y el radio de la fractura para la mayor cantidad de réplicas es de 190 a 600m aproximadamente, existen dos réplicas que aparecen alejadas del grupo principal, corresponden a la réplica número 32 y la 68 para estas réplicas el momento sísmico escalar está en el orden de 10^{17}N.m y el radio de fractura es de 2000m.

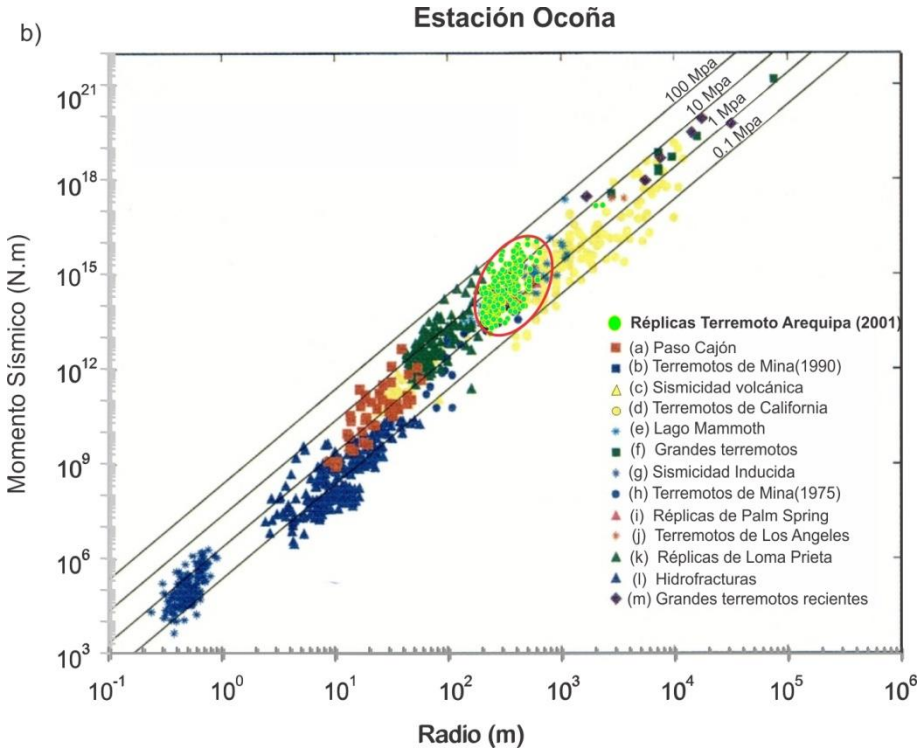


Figura 8.4.b) *Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Ocoña. Modificado Abercrombie y Leary, (1993).*

Las estaciones Tocota y Ocoña registraron la mayor cantidad de réplicas 235 y 223 respectivamente y la estación Caravelí registró 191 réplicas, en la Figura 8.4.c) los valores de momento sísmico escalar están en el orden de 10^{13} a 10^{16}N.m y el radio de fractura de 200 a 3600m. La réplica 32 está fuera de la elipse roja y el radio de fractura es de 3610m y la réplica 68 tiene un radio de 1150m.

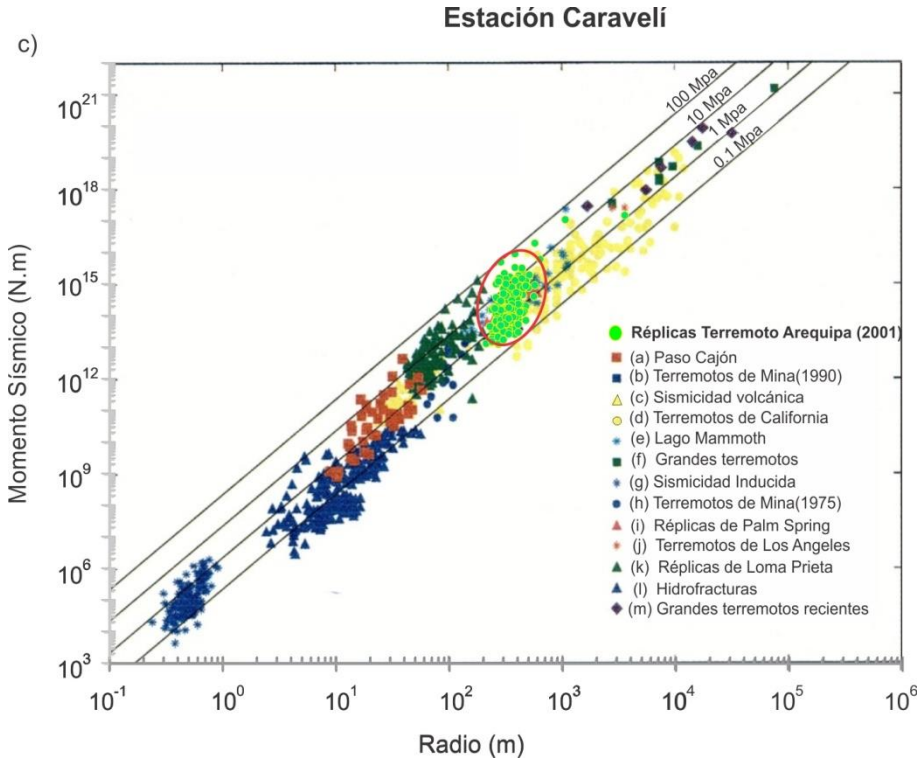


Figura 8.4.c) *Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Caravelí. Modificado Abercrombie y Leary, (1993).*

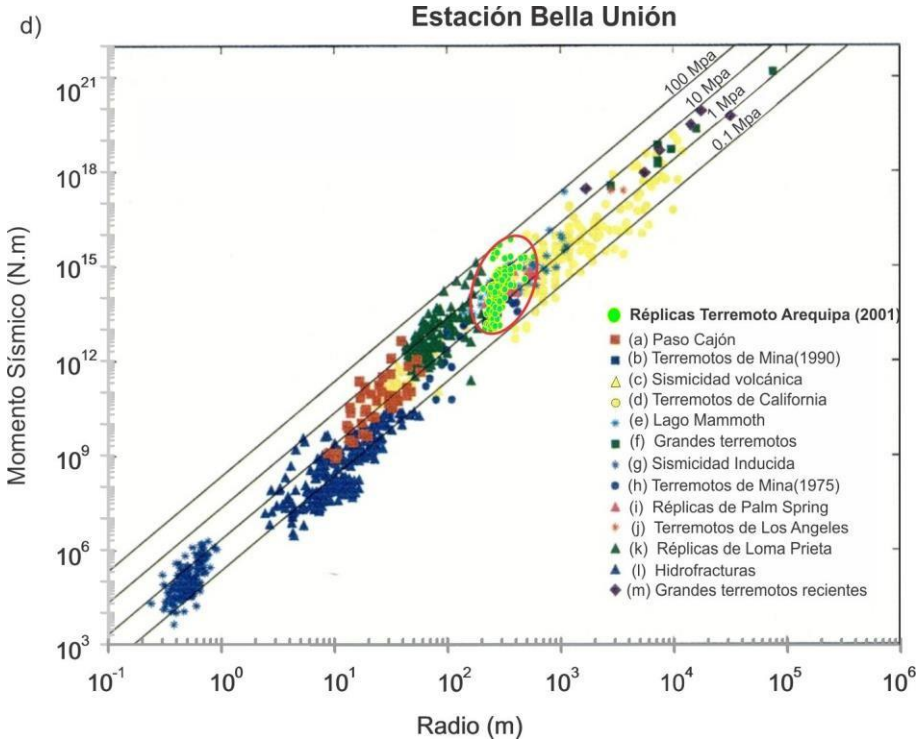


Figura 8.4.d) *Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Bella Unión. Modificado Abercrombie y Leary, (1993).*

La estación Bella Unión registró 116 réplicas del terremoto de Arequipa, sin registrar la réplica número 32 y la 68, en la Figura 8.4.d) se observa que los valores de momento sísmico escalar están en el orden de 10^{13} a 10^{16}N.m y el radio de la fractura en el orden de 200 a 500m. En la Figura 8.4.e) se presentan las réplicas registradas en la estación Quilca que registró 35 réplicas, se observa la réplica 32 que está fuera de la elipse roja, los valores de momento sísmico escalar de las réplicas están en el orden de 10^{13} a 10^{17}N.m y el radio de fractura está en el orden de 240 a 4900m.

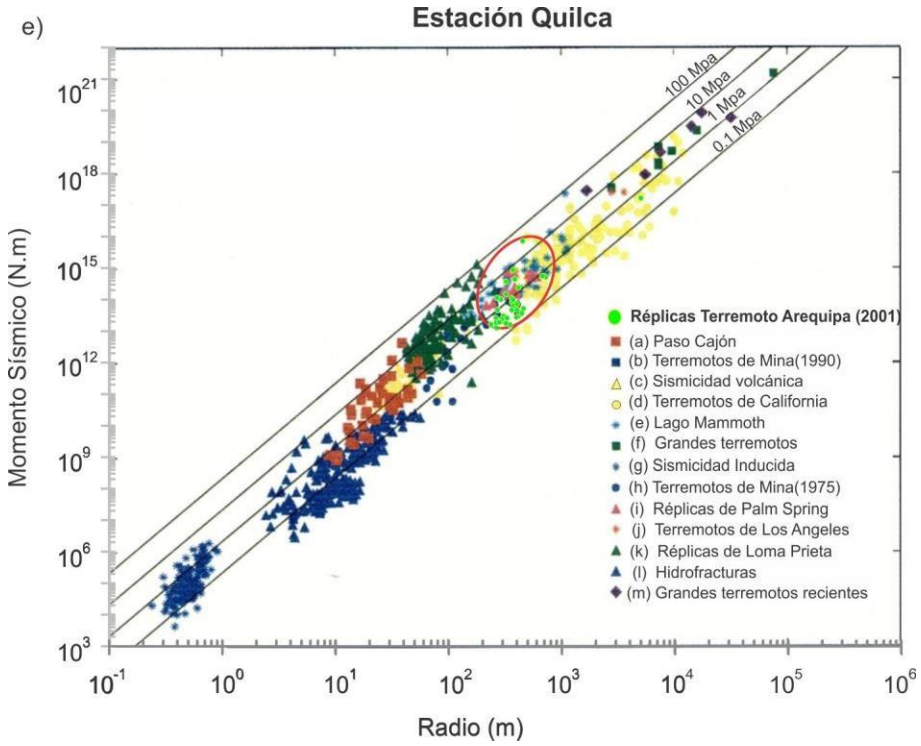


Figura 8.4.e) *Relación entre el logaritmo del momento sísmico escalar (Mo) y el radio de la fractura (r), Estación Quilca. Modificado Abercrombie y Leary, (1993).*

Los valores de caída de esfuerzos determinados en este estudio varían en el rango de 0.1 a 100 Mpa, (están señalados con una elipse roja) para las cinco estaciones sísmicas el valor mínimo de caída de esfuerzos es 0.13Mpa y el máximo es 98.76Mpa, observándose coherencia con los resultados obtenidos por Abercrombie y Leary (1993), lo que demuestra que la aplicación de la técnica del análisis espectral ha sido adecuada para determinar los parámetros de la fuente sísmica para las cinco estaciones, los valores de

momento sísmico escalar se encuentran en el rango de 10^{12} a 10^{16}, además se presentan en forma alejada del grupo principal dos réplicas (réplica 32 y 68) con un momento sísmico escalar de 10^{17}N.m.

Por otro lado, Allman y Shearer (2009) analizaron minuciosamente el comportamiento de la caída de esfuerzos para más de 2000 terremotos a escala global con magnitudes ≥ 5.5Mb, registrados durante el periodo de 1990 al 2007, añadieron una recopilación de sismos analizados en estudios de Hough (1996), Boatwright, (1994), Mori y Frankel (1990), Tajima y Tajima (2007), Humphrey y Anderson (1994), Archuleta et al., (1982), Venkataraman y Kanamori (1994) y Abercrombie (1995). En dicho estudio se utilizó el modelo de fuente de Brune y aplicaron la técnica de "Aislamiento del espectro de desplazamiento" para la onda P, con la finalidad de construir la relación entre la "Frecuencia esquina, el momento sísmico escalar y la Magnitud Momento", mostrada en la Figura 8.5, donde se observa que la caída de esfuerzos (Δσ) varía de 0.1 a 100Mpa, siendo este parámetro constante.

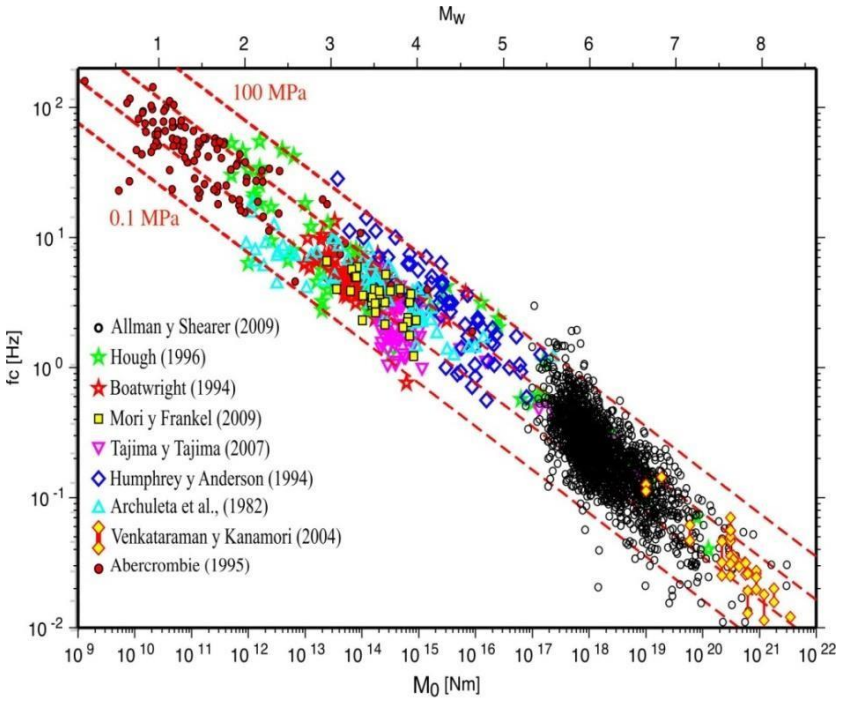


Figura 8.5. *Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior). Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Allman y Shearer, 2009).*

En la Figura 8.6 se han representado los resultados de frecuencia esquina (fc), momento sísmico escalar (M_0)y Magnitud Momento (Mw) obtenidos en esta investigación, con la finalidad de observar su comportamiento, para las estaciones 8.6.a) Estación Tocota, 8.6.b) Estación Ocoña, 8.6.c) Estación Caravelí, 8.6.d) Estación Bella Unión y 8.6.e) Estación Quilca, (círculos color naranja dentro de la elipse roja), observándose correlación con los resultados obtenidos por Allman y Shearer (2009); por lo tanto, la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$) no depende de la magnitud del sismo, el valor siempre es constante. De acuerdo a la figura de Allman y Shearer las réplicas del terremoto de Arequipa del 2001 se ubican junto a las réplicas del Nor-este de Norte América con magnitud 3≤ML6≤ que son las estrellas rojas (Boatwright, 1994), cerca de los rombos en azul que corresponden a 82 terremotos de México con magnitudes de 3-7ML (Humphrey y Anderson, 1994), las estrellas verdes son las réplicas de Loma Prieta (Hough,1996), cuadrados en amarillo réplicas de Palm Spring (Mori y Frankel,1990), triángulos en celeste réplicas de Lago Mammoth (Archuleta et al., 1982). En la Figura 8.6.a) las réplicas de la estación Tocota se encuentran dentro de la elipse roja, en el eje de ordenadas se tiene la frecuencia esquina, sus unidades son Herzt (Hz), en la escala inferior el momento sísmico escalar (M_0) sus unidades Newton.metro y en la escala superior la Magnitud Momento (Mw). Los valores de frecuencia esquina varían de 3.5 a 10Hz, sin embargo las réplicas 32 y 68 tienen frecuencias esquina de 0.3 y 0.4Hz, es probable que ambos valores de frecuencia esquina se encuentran en este rango debido a la calidad del registro sísmico, el momento sísmico escalar está en el rango de 10^{12} a 10^{15}N.m y la magnitud momento para la mayoría de réplicas es de 2.5 a 5Mw de acuerdo a la Figura 8.6.a), esto es coherente con los resultados obtenidos del análisis espectral, la magnitud momento determinada para la Estación Tocota es de 2.36 a 5.48Mw, entonces el diagrama de tres escalas utilizado permite correlacionar estos tres parámetros de la fuente sísmica, los valores de caída de esfuerzos varían de 0.1 a 100Mpa.

La Figura 8.6.b) presenta las réplicas de la estación Ocoña los valores de frecuencia esquina del grupo grande varían de 3 a 8Hz, en tanto que las

réplicas 32 y 68 tienen como frecuencia esquina 0.6 y 0.7Hz. Los valores de momento sísmico escalar está en el rango de 10^{13} a 10^{16}N.m. La magnitud momento de las réplicas está comprendida de 2.7 a 5Mw.

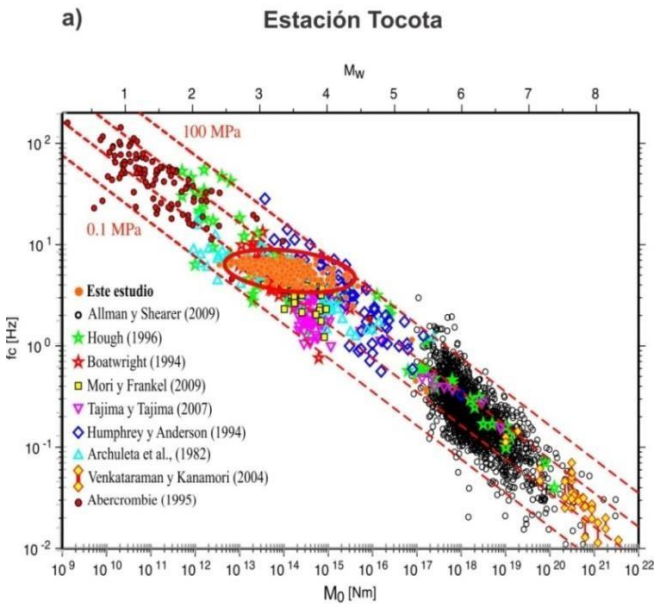


Figura 8.6.a) *Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Tocota. Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado Allman y Shearer, 2009).*

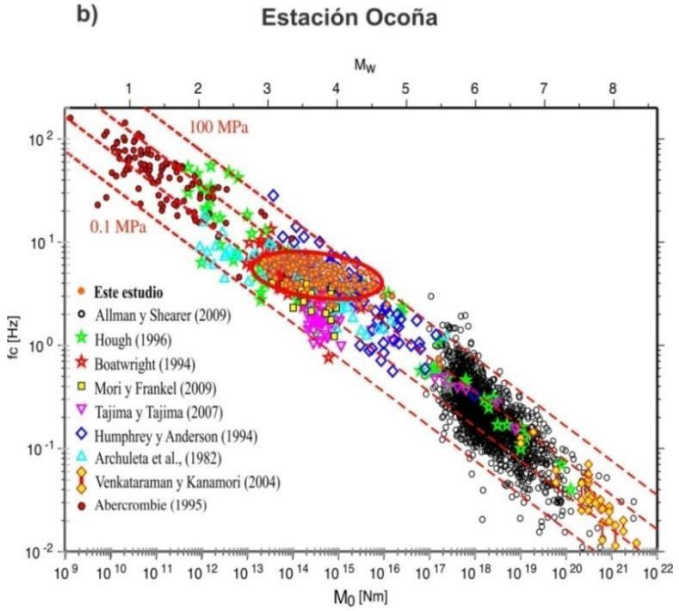


Figura 8.6.b) *Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Ocoña. Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado Allman y Shearer, 2009).*

Las réplicas de la estación Caravelí se representan en la Figura 8.6.c) la mayor cantidad de réplicas tiene una frecuencia esquina de 3 a 7Hz, están presentes la réplica 32 y 64 con frecuencias esquina de 0.4Hz, los valores de momento sísmico están en el rango de 10^{13} a 10^{16}N.m. La magnitud momento varía de 2.7 a 5,4Mw.

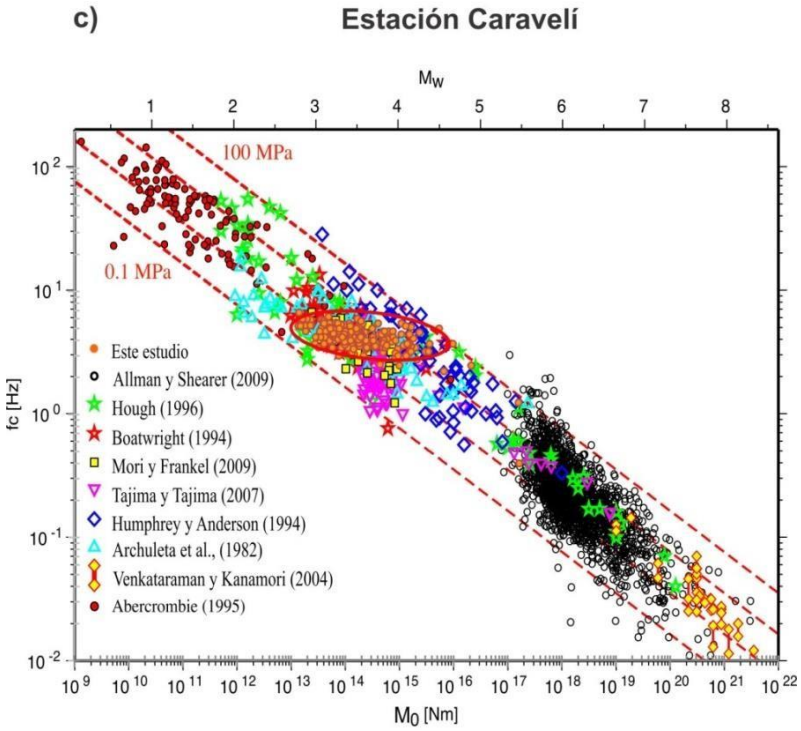


Figura 8.6.c) *Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Caravelí. Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado Allman y Shearer, 2009).*

En la Figura 8.6.d) se tienen las réplicas de la estación Bella Unión (sin las réplicas número 32 y 68), los valores de frecuencia esquina están en el intervalo de 3 a 7Hz, el momento sísmico escalar está en el orden de 10^{13} a 10^{15}N.m y la magnitud momento está comprendida de 2.6 a 4.5Mw.

Las réplicas de la estación Quilca se representan en la Figura 8.6.e) la mayor cantidad de réplicas tiene una frecuencia esquina de 3 a 7 Hz, está presente la réplica 32 con frecuencia esquina de 0.4 Hz, los valores de momento sísmico están en el rango de 10^{12} a 10^{15}N.m. La magnitud momento varía de 2.5 a 4Mw.

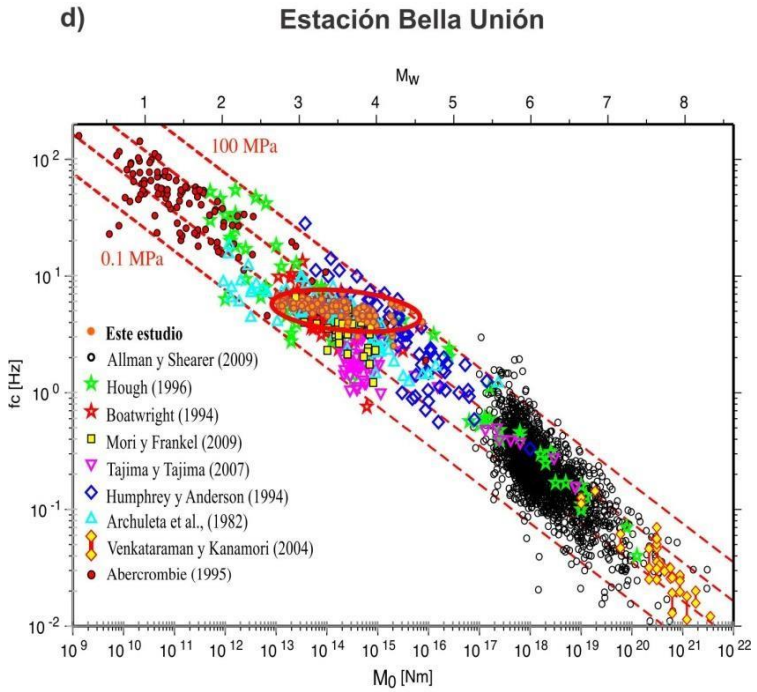


Figura 8.6.d) *Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Bella Unión. Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado Allman y Shearer, 2009).*

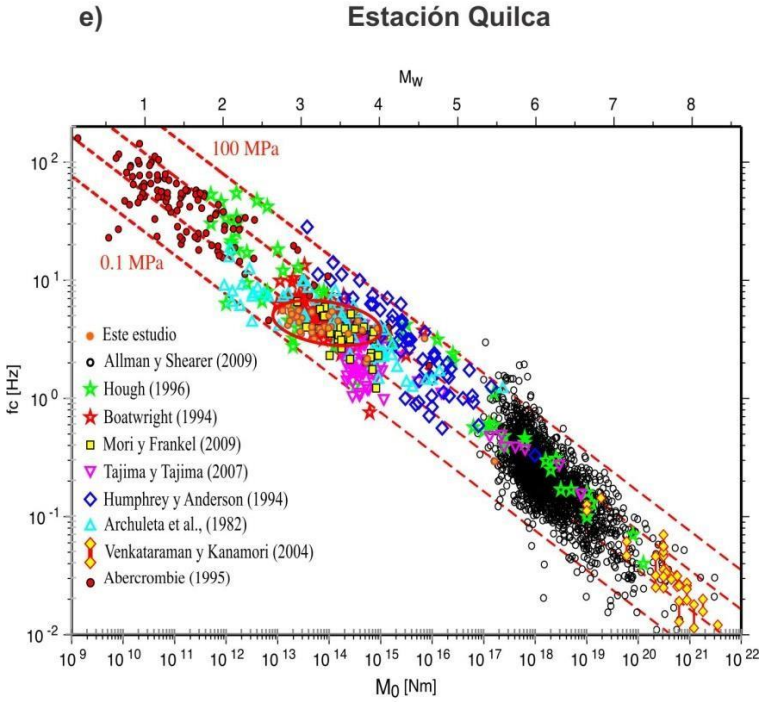


Figura 8.6.e) *Relación entre el logaritmo de la frecuencia esquina, el momento sísmico (escala inferior) y la Magnitud Momento Sísmico (escala superior) Estación Quilca. Las líneas rojas representan la caída de esfuerzos de 0.1, 1, 10 y 100Mpa (Modificado Allman y Shearer, 2009).*

Finalmente los valores de caída de esfuerzos para las réplicas del sismo de Arequipa son similares a los obtenidos por Abercrombie y Leary (1993) para terremotos de California y el mundo. Los parámetros de la fuente como momento sísmico, radio de la fractura, caída de esfuerzos, magnitud momento y magnitud energía han sido correctamente determinados, con valores razonables para sus rangos de magnitud, como se puede demostrar en la Tabla 7.3. Estación Tocota y en el Anexo 1, donde se presentan los resultados para las estaciones Ocoña, Caravelí, Bella Unión y Quilca.

Los valores de frecuencia esquina, momento sísmico escalar y magnitud Mw, obtenidos en este estudio a partir del análisis espectral para las réplicas del sismo de Arequipa del 2001, son coherentes con los resultados propuestos por Allman y Shearer (2009) que efectuaron estudios de grandes y pequeños terremotos a escala global

CONCLUSIONES

El análisis espectral aplicado a la secuencia de réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. El ***momento sísmico escalar*** determinado se encuentra en el rango de $3.45x10^{12}$ a $1.63x10^{17}$N.m.
2. Los valores de ***radio de la fractura*** obtenidos están en el rango de 0.19 a 4.98km.
3. Los valores de ***caída de esfuerzos*** para las réplicas analizadas se encuentran entre 0.13 a 98.76Mpa, lo cual evidencia que este parámetro es constante sin tomarse en cuenta la magnitud del sismo; es decir, sismos de menor o mayor magnitud siempre desarrollan similares valores de caída de esfuerzos.
4. La ***Magnitud Momento Sísmico*** presenta valores de 2.36 a 5.48Mw.
5. La ***Magnitud Energía*** está comprendida de 3.27 a 4.47Me.
6. El diagrama de caída de esfuerzos que representa mejor los resultados obtenidos en la investigación corresponde a la estación Tocota (Figura 7.8).

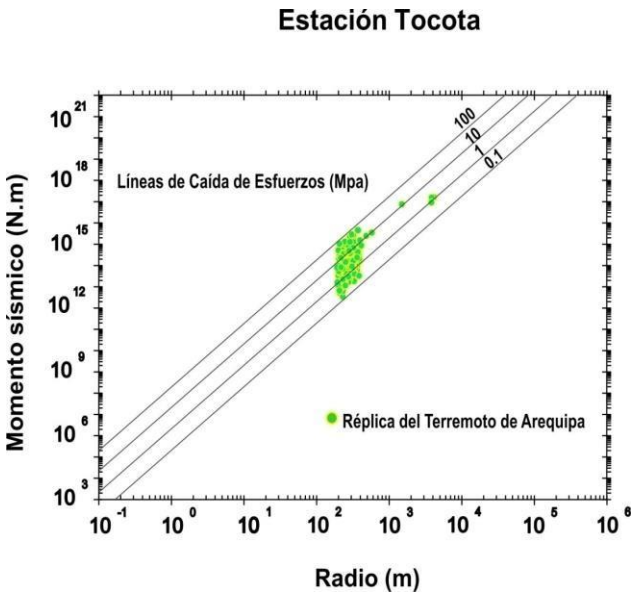


Figura 7.8. *Relación entre el logaritmo de Mo y r para las réplicas del terremoto de Arequipa, registradas en la estación Tocota.*

7. La metodología empleada en el análisis espectral nos permite obtener resultados de calidad.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere aplicar el análisis espectral y el modelo de Brune para evaluar los parámetros de la fuente sísmica de grandes terremotos, como el ocurrido en Pisco (2007).
2. Se recomienda hacer un control de calidad adecuado de las señales sísmicas para seguir la metodología que se ha propuesto.

BIBLIOGRAFÍA

Abercrombie, R. y Leary, P., (1993). Source parameters of small earthquakes recorded at 2.5 km depth, Cajon Pass, Southern California: Implications for earthquake scaling. Geophysical Research Letters Vol 20, p. 1511-1514.

Abercrombie, R. (1995). Earthquake source scaling relationships from 1 to 5 ML using seismograms recorded at 2.5 km depth, J. Geophys. Res., 100, 24,015 – 24,036.

Aguilar, Z. y Alva, J., (1991). Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Arequipa.VI Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones.

Aki, K. y Richards, G., (1980). Quantitative Seismology, Freeman and Co., New York.

Aki, K. y Richards G., (2002). Quantitative Seismology. Second Edition, University Science Books, p. 101-113.

Aki, K., (1966). 4. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 14, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy and stress-strain drop from G wave spectrum. Bulletin of the Earthquake Research Institute 44: 73–88.

Aki, K., (1967). Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., 72, 1217–1231.

Allmann, B. y Shearer, P., (2009). Global variations of stress drop for moderate to large earthquakes. J. Geophys. Res. 114, B01310, doi: 10.1029/2008JB005821.

Archuleta, R., Cranswick, E., Mueller, C. y Spudich, P., (1982). Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes California earthquake sequence. J. Geophys., 87, 4595-6407.

Barazangi, M. y Isacks B., (1976). Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. Geology., 4, 686-692.

Beauduin, R., Lognonné, P., Montagner, J. P., Cacho, S., Karczewski, J. F. y Morand, M., (1996). The effects of the atmospheric pressure changes on seismic signals, Bull. Seism. Soc. Am., 86(6), 1760-1769.

Ben-Menahem, A., Smith, S. W. y Teng, Ta-Liang, 1965. Aprocedure for source studies from spectrum of long-period seismic body waves. Bull. Seismol. Soc. Am., 55: 203-235.

Bernal, I., H. Tavera y Antayhua Y., (2001). Evaluación de la Sismicidad y Distribución de la Energía Sísmica en Perú. IGP Boletín de la Soc. Geológica del Perú. V.92, 67p.

Bernal, I., (2002). Aproximación a un Modelo Detallado de la Sismicidad en el Perú: Características y Evaluación de la Energía Sísmica Liberada. Tesis de Grado Universidad Nacional de San Agustín. 220p.

Boatwright, J., (1980). A spectral theory for circular seismic sources: simple estimates of source dimension, dynamic stress drop, and radiated energy. Bull. Seism. Soc. Am, 70, 1-26.

Boatwright, J., (1980). Preliminary body-wave analysis of the St. Elias, Alaska earthquake of february 28, 1979. BSSA, 70, 419-436.

Boatwright, J. (1994). Regional propagation characteristics and source parameters of earthquakes in northeastern North America, Bull. Seismol. Soc. Am., 84(1), 1 – 15.

Brigham, E. O., (1988). The Fast Fourier Transform and Its Applications, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Britton, C., (1993). Digital Filter Designer's Handbook: Featuring C Routines. Electronic Design & Construction.352 p.

Brune, J. N., (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, J. Geophys. Res., 75, 4997–5009.

Brune, J. N., (1971).Correction, J. Geophys. Res., 76.

Burridge, R. y Knopoff L., (1964). Body force equivalents for seismic dislocations. Bull. Seisin. Soc. Am., 5d, 1875-1888.

Cahill, T. y Isacks B., (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. J. Geophys. Res, 97, 17.503-17.529.

Choy, G. L., y Boatwright, J., (1995). Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress. J. Geophys. Res., 100, B9, 18,205-18,228.

Cutipa, G., (2006). Análisis de los niveles de ruido sísmico en estaciones sísmicas de Banda Ancha de la Red Sísmica Nacional del Perú. Tesis de grado UNSA. 138 p.

Cutipa, G. y Tavera, H., (2006). Niveles de ruido en estaciones sísmica de banda ancha de la red sísmica nacional Perú. XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Sociedad Geológica del Perú.

Dalmayrac, B.; Laubacher, G.; Marocco, R. (1988). Caracteres generales de la evolución geológica de los Andes Peruanos. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima. Boletín Nº 12 serie D. Estudios especiales.

Dass, S y Aki, K., (1977). Fault planes with Barriers: A versatile earthquake model, J. Geophys. Res., p.5658-5670.

Del Pezzo, E., G. De Natale, M. Martini y A. Zollo., (1987). Source parameters of microearthquakes at Phlegraean Fields (southern Italy) Vocanic area, Phys. Earth Planet. Int.47, 25-42.

DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, y S. Stein., (1990). Current plate motions, Geophy.J.Int., 101, 425-478.

Ericksen, G. E., Plafker, G. y Fernandez, J., (1970). Preliminary report on the geologic events associated with the May 31, 1970, Peru earthquake. U. S. Geological Survey, Washington, DC, Geological Survey Circular, 639, 25 p.

Goodman, R.E. (1989). Introduction to Rock Mechanics. New York, John Wiley, 562 p.

Grange, F., (1984). Etude sismotectonique detaille de la subduction lithospherique au sud Perou. Tesis Doctoral, Origm, Grenoble, Francia.

Grange, F., D. Hatzfeld, P. Cunningham, P. Molnar, S. Roecker, G. Suarez, A. Rodriguez y L. Ocola., (1984). Tectonics implications of the microearthquake seismicity and fault plane solutions in southern Peru. J. Geophys. Res., 89, 6139-6159.

Gutenberg, B., y Richter, C., (1956). Magnitude and energy of earthquakes, Ann. Geofis., 9, 1-15.

Hanks, T. C. y Wyss, M., (1972). The use of body wave spectra in the determination of seismic source parameters. Bull seism. Soc. Am., 62, 561-589.

Hasegawa, A. y S. Sacks., (1981). Subduction of the Nazca plate beneath Peru as determined from seismic observations. J. Geophys. Res., 86, 4971-4980.

Haskell, N.A., (1964). Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults, Bull. Seism. Soc. Am., 54, 1, 811 1,841.

Heaton, T. H., (1990) Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture, Phys. Earth Planet, Int.64, 1-20.

Heras, H. (2002). Análisis de la distribución del valor de b en la zona de subducción de Perú.Tesis de grado Universidad Nacional de San Agustín, 106 p.

Hough S.E., Seeber, L., Lerner-Lam, A., Armbruster, J.C. & Guo, H., (1991). Empirical Green's function analysis of Loma Prieta aftershocks, Bull. Seism. Soc. Am.,81. 1737–1753.

Humphrey, J. y J. Anderson (1994). Seismic source parameters from the Guerrero subduction zone, Bull. Seismol. Soc. Am., 84(6), 1754 – 1769.

Kanamori, H. (1981) The Nature of Seismicity Patterns Before Large Earthquakes, in Earthquake Prediction (eds D. W. Simpson and P. G. Richards), American Geophysical Union, Washington, D. C.. doi: 10.1029/ME004p0001

Kanamori, H. y Anderson, D. (1975).Theoretical bases for some empirical relations in seismology. BSSA, 65, 1073-1095.

Keilis-Borok, V., (1960). Investigation of the mechanism of earthquakes, Sov. Res. Geophys., 4, 29.

Klein, F.W., (1978). Hypocenter location program HYPOIN VERSE Part 1. Users Guide to Versions 1, 2, 3 and4. US. Geol. Surv. Open-File Rept, 78-694.

Kondorsaya, N. V., Solovieva, O. N., Zakharova. A. I., Yanovskaya, T.B., Chepkunas, L.S. y Pavlona, L. N., (1979). The earthquake of March 4. 1977. Its recording peculiarities and source parameters. Tectonophysics, 53: 203-215.

Kulhanek, O. y Meyer, K., (1979). Source parameters of the Volvi-Langadhas eatrhquake of June 20. 1978 deduced from body-wave spectra at station Uppsala and Kiruna. Bull. Seismol. Soc. Am., 69: 1289-1294

Kulhanek, O., Torild Van Eck, Norris . J., Meyer. K. y Wahlstroem, R., (1983). Spectra of the earthquake sequence February-March. 1981, in South-Cental Sweden. Tectonophysics, 93: 337-350.

Lindo, R., (1993). Seismotectonique des andes du Perou Central: Apport des donnes sismologiques de haute precisión. Tesis Doctoral. Universidad Louis-Pasteur de Strasbourg, Francia.

Macharé, J. Fenton, C.H., Machette, M.N, Lavenu, A., Costa, C. y Dart,. (2003). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Peru ans its offshore regions: U.S. Geological Survey Open-File Report 03- 0451, 54 p., 1 plate (1:3,000,000 scale).

Madariaga, R., (1976). Dynamics of an expanding circular fault, Bull. Seism. Soc. Am., 66, 639–666.

Madariaga, R., (1979). On the relation between seismic moment and stress drop in the presence of stress and strength heterogeneity. Journal of Geophysical Research. Vol.84, N°.B5.8B0926.

Madariaga, R., (1994). Dynamic of seismic source. Física de la tierra, Núm.6.29-72. Editorial Complutense.Madrid.

Marocco, R., (1980).Géologie des Andes péruviennes: Un segment E-W de la chaíne des Andes péruviennes: la déflecion d' Abancay. Etude géologique de la Cordillére Orientale et des Hauts Platenaux entre Cuzco et San Miguel. Sud du Peérou. Doc.Orstom 94.

Maruyama, T., (1963). On the force equivalents of dynamical elastic dislocations with reference to the earthquake mechanism, Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ. 41,467-486.

Mattauer, M., (1989). Monts et Merveilles, Beautés et richesses de la Géologie. Hermann Editores de Ciencias y Arte. Paris, Francia.

McGarr, A., J. Bicknell, J. Churcher y S.Spottiswoode., (1990). Comparison of ground motion from tremors and explosions in deep gold mines, J. Geophys. Res., 95, 21777-21792.

Molnar, P., B.E. Tucker, and J.N. Brune (1973): Corner frequencies of P and S waves and models of earthquake sources; Bull. Seism. Soc. Am., 63, 2091-2104.

Mori, J. y Frankel A. (1990). Source parameters for aftershocks of the 1986 North Palm Springs earthquake, Bull. Seism, Soc. Am. 80, p.278-295.

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

Nabeleck., (1984). Tésis PHD, Massachusetts Institute of Technology, Cambrige.

Norabuena, E., L. Leffler-Griffin, A. Mao, T. Dixon, S. Stein, I. Sacks, L. Ocola, y M. Ellis., (1998). Space geodetic observation of Nazca - South America convergence across the Central Andes, Science, 279, 358 – 362.

Payo, G., (1986). Introducción al análisis de sismogramas. Monografía del Instituto Geográfico Nacional, Madrid.

Pearson, C., (1982). Parameter and a magnitude moment relationship from small earthquakes observed during hydraulic fracturing experiments in crystalline rocks. Gephys. Res. Lett, 9, 404-407.

Rodriguez, L. y Tavera, H. (1991). Determinación con alta resolución de la geometría de la zona Wadati-Benioff en el Perú Central. Revista Brasileira de Geofísica., 9, 141-159.

Sebrier, M., Huaman, D., Blanc, J., Machare, J., Bonnot, D. y Cabrera, J. (1985). Observaciones acerca de la neotectónica del Perú. IGP-LDGDI pro. Sisra, Grup. Peruano de Neotectónica, 96 pp.

Sebrier, M., J. Mercier, J. Machare, D. Bonnot, J. Cabrera y J. Blanc (1988). The state of stress in an overriding plate situated above a flat slab: The Andes of central Peru. Tectonics. 7, 895-928.

Scherbaum, F. y Stoll, D., (1983). Source parameters and scaling laws of the 1978 Swabian Jura (southwest Germany) aftershocks, Bull. Seismol. Soc. Am., 73, 1321-1343.

Schneider, J. y Sacks, B. (1987). Stress in the contorted Nazca plate beneath Southern Peru from Local earthquakes, Journal.Geophy. Res., 92, pp 13887-13902.

Silgado, E., (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú, 1513-1974. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima,131 p.

Stauder, W., (1975). Subduction of the Nazca plate under Perú as evidenced by focal mechanism and by seismicity, J. Geophys. Rs. 80, 053-1064.

Stavrakakis, G., Drakopoulos, J., Latoussakis, J., Papanastassiou D. y Drakatos, G., (1989). Spectral characteristics of the 1986 September 13 Kalamata (southern Greece) earthquake. Geophys. J. Int. (1989) 98, 149-157.

Tajima, R., y F. Tajima (2007). Seismic scaling relations and aftershock activity from the sequences of the 2004 mid Niigata and the 2005 west off Fukuoka earthquakes (Mw 6.6) in Japan, J. Geophys. Res., 112, B10302.

Tavera, H. (1992). El Proceso de Ruptura Sísmica: Barrera o Aspereza. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú. Vol. 83.p. 69-73

Tavera, H., (1998). Mecanismo focal de terremotos en Perú y Sismotectónica. Tesis PhD. Universidad Complutense, Madrid, 400 p.

Tavera, H. y Buforn E., (1998). Sismicidad y Sismotectónica de Perú. En A. Udías y E. Buforn (Editores): Sismicidad y Sismotectónica de Centro y Sur América. Revista Física de la Tierra, Universidad Complutense de Madrid, Núm. 10, 187-219.

Tavera, H y Buforn, E., (2001). Source mechanism of earthquake in Peru.Journal of Seismology 5:519-539.

Tavera, H., (2002). Terremoto de la región Sur de Perú del 23 de Junio del 2001. Centro Nacional de Datos Geofísicos.

Tavera, H., Buforn, E., Bernal, I., Antayhua, Y. y Vilcapoma, L., (2002). The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. Journal of Seismology 6: 279-283.

Tavera, H., Fernández, E., Bernal, I., Antayhua, Y., Agüero, C., Salas, H., Rodriguez, S., Vilcapoma, L., Zamudio, Y., Portugal, D., Inza, A., Carpio, J., Callo, F. y Valdivia, I., (2006). The southern región of Peru earthquake of June 23rd, 2001. Journal of Seismology (2006). Doi: 10.1007/s10950-006-9014-2.

Tavera H. y Bernal I., (2009). Mapa de distribución terremotos superficiales, intermedios y profundos 1964-2008. Instituto Geofísico del Perú – IGP, Diciembre 2009.

Thatcher, W., (1972). Regional variations and seismic source parameters in the northern Baja California area. J. Geophys. Res., 77: 1549-1566.

Thatcher, W. y Hanks, T. C., (1973). Source parameters of southern California earthquakes. J. Geopphys. Res., 78, 8547-8576.

Venkataraman, A., y H. Kanamori (2004). Observational constraints on the fracture energy of subduction zone earthquakes. J. Geophys. Res., 109, B05302.

Wyss, M. y Hanks, T. C., (1972). The source parameters of the San Fernando earthquake inferred from teleseismic body waves. Bull. Seismol. Soc. Am., 62:591-602.

ANEXOS

ANEXO 1

Parámetros de la fuente sísmica de las réplicas del Terremoto de Arequipa del 2001

Tabla 7.3. Estación Tocota(*)

Tabla 1. Estación Ocoña

Tabla 2. Estación Caravelí

Tabla 3. Estación Bella Unión

Tabla 4. Estación Quilca

*La Tabla 7.3 con resultados de la Estación Tocota se encuentra en el Capítulo VII.

ANEXO 1

Tabla 1. Parámetros de la fuente sísmica de réplicas de la estación Ocoña

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
12	29/06/01	06:03:30	-16.399	-73.465	33.1	2.8	1.48E+14	0.21	6.68	3.45	3.70
13	29/06/01	06:16:56	-16.439	-73.389	36.2	3.1	3.43E+13	0.21	1.72	3.02	3.54
14	29/06/01	06:23:36	-16.466	-73.651	18.4	2.9	4.53E+13	0.21	2.27	3.10	3.57
15	29/06/01	06:45:18	-17.101	-73.865	3.3	3.0	4.84E+14	0.31	6.90	3.79	3.84
16	29/06/01	07:10:34	-16.545	-73.653	34.8	3.7	2.78E+13	0.21	1.39	2.96	3.51
17	29/06/01	08:04:36	-16.976	-73.705	9.9	2.8	8.26E+13	0.37	0.75	3.28	3.64
18	29/06/01	08:16:39	-16.795	-72.859	19.7	2.8	7.61E+13	0.21	3.50	3.25	3.63
20	29/06/01	10:27:03	-16.480	-73.528	21.5	2.8	4.04E+14	0.22	16.24	3.74	3.82
21	29/06/01	11:21:57	-16.824	-72.758	41.8	3.1	7.05E+13	0.34	0.79	3.23	3.62
22	29/06/01	11:54:09	-16.369	-73.772	5.8	3.1	1.35E+14	0.29	2.41	3.42	3.69
23	29/06/01	11:57:58	-18.184	-71.710	13.7	2.8	4.89E+15	0.41	30.68	4.46	4.09
24	29/06/01	12:19:54	-16.406	-73.741	13.9	3.6	7.47E+13	0.22	3.22	3.25	3.63
27	29/06/01	14:57:46	-16.502	-73.501	21.9	3.9	4.51E+13	0.21	2.03	3.10	3.57
28	29/06/01	16:35:52	-16.078	-74.569	13.8	2.8	1.53E+15	0.51	5.18	4.12	3.96
29	29/06/01	16:42:41	-16.480	-73.460	26.1	3.2	4.32E+14	0.24	12.98	3.76	3.82
30	29/06/01	16:58:42	-16.085	-74.549	19.8	4.8	8.64E+14	0.35	8.72	3.96	3.90
31	29/06/01	18:01:59	-16.526	-73.498	30.1	2.7	4.91E+14	0.36	4.60	3.79	3.84
32	29/06/01	22:33:19	-18.448	-71.519	9.4	3.0	1.63E+17	2.22	6.55	5.47	4.47
33	29/06/01	22:56:07	-16.445	-73.641	20.0	4.3	5.29E+14	0.34	6.16	3.82	3.85
34	29/06/01	22:56:50	-16.308	-73.859	11.3	3.0	1.56E+15	0.37	14.04	4.13	3.97
35	29/06/01	23:41:55	-16.470	-73.182	55.8	2.7	8.86E+13	0.41	0.56	3.30	3.65
36	29/06/01	23:50:45	-17.058	-72.657	14.5	2.9	1.48E+15	0.35	15.49	4.11	3.96
37	30/06/01	02:02:02	-16.437	-73.388	39.3	3.1	4.57E+13	0.24	1.45	3.11	3.57
38	30/06/01	02:54:42	-16.302	-74.055	18.9	2.5	2.53E+14	0.37	2.28	3.60	3.76
40	30/06/01	05:05:57	-16.681	-73.304	26.9	2.8	4.06E+13	0.32	0.54	3.07	3.56
42	30/06/01	07:43:14	-16.486	-73.526	24.2	3.1	4.81E+13	0.22	1.93	3.12	3.58
43	30/06/01	07:51:12	-16.693	-74.010	3.3	2.8	5.17E+14	0.47	2.15	3.81	3.84
44	30/06/01	08:34:48	-16.454	-73.555	13.9	2.8	2.69E+13	0.24	0.83	2.95	3.51
45	30/06/01	08:50:45	-16.933	-73.513	11.6	2.8	1.04E+14	0.46	0.48	3.35	3.66
46	30/06/01	11:11:00	-16.448	-73.682	24.8	3.2	8.02E+13	0.27	1.70	3.27	3.63
47	30/06/01	11:32:25	-16.379	-73.847	23.4	3.0	1.11E+14	0.35	1.12	3.36	3.67
48	30/06/01	12:06:23	-16.817	-73.712	21.1	3.0	7.53E+14	0.50	2.69	3.92	3.89
49	30/06/01	13:46:14	-16.543	-73.641	34.0	3.0	6.79E+13	0.37	0.57	3.22	3.62
50	30/06/01	14:46:39	-16.417	-73.465	43.6	3.4	5.99E+14	0.29	10.97	3.85	3.86
51	30/06/01	15:28:11	-17.210	-72.273	5.1	3.1	1.99E+14	0.24	5.99	3.53	3.74
52	30/06/01	16:31:30	-16.797	-72.955	25.8	2.7	1.54E+14	0.25	4.28	3.46	3.71
55	30/06/01	23:25:56	-16.898	-73.696	0.3	3.7	1.03E+14	0.44	0.54	3.34	3.66
56	01/07/01	00:18:14	-16.295	-74.088	5.2	3.2	6.45E+15	0.41	42.27	4.54	4.12
59	01/07/01	06:26:14	-16.451	-73.579	49.5	3.9	3.76E+13	0.27	0.84	3.05	3.55

Tabla 1. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
60	01/07/01	07:01:03	-16.474	-73.623	42.7	3.1	1.40E+14	0.29	2.56	3.43	3.70
61	01/07/01	07:40:45	-16.768	-73.789	12.1	3.9	5.01E+15	0.42	28.81	4.47	4.09
63	01/07/01	09:24:02	-16.320	-74.022	14.5	2.7	1.88E+14	0.26	4.59	3.52	3.73
64	01/07/01	09:54:20	-16.476	-73.456	42.0	3.5	9.71E+13	0.24	3.07	3.32	3.66
65	01/07/01	10:13:10	-17.493	-72.285	28.1	3.8	2.78E+15	0.58	6.36	4.30	4.03
66	01/07/01	10:15:28	-16.534	-73.499	32.2	2.8	7.93E+14	0.59	1.71	3.93	3.89
67	01/07/01	10:46:51	-15.965	-74.773	18.3	3.0	2.26E+15	0.37	18.92	4.24	4.01
68	01/07/01	11:06:28	-17.376	-73.427	0.7	3.3	1.58E+17	1.92	9.75	5.47	4.47
70	01/07/01	12:16:57	-16.475	-73.481	0.2	3.0	2.17E+15	0.31	31.99	4.22	4.00
71	01/07/01	12:41:00	-16.332	-74.022	15.4	3.3	3.77E+15	0.44	18.94	4.38	4.06
72	01/07/01	12:59:33	-16.276	-74.079	46.9	3.2	2.01E+14	0.41	1.26	3.54	3.74
73	01/07/01	12:59:58	-16.210	-74.038	43.0	3.1	1.94E+14	0.32	2.59	3.53	3.73
74	01/07/01	13:03:47	-16.474	-73.477	38.6	3.9	5.89E+14	0.29	10.78	3.85	3.86
75	01/07/01	13:38:48	-16.341	-74.016	17.3	4.0	5.36E+14	0.24	16.12	3.82	3.85
76	01/07/01	14:52:44	-16.468	-73.806	46.8	3.0	1.30E+14	0.25	3.62	3.41	3.69
77	01/07/01	15:28:19	-16.344	-74.072	30.0	3.0	2.33E+15	0.38	18.70	4.24	4.01
78	01/07/01	15:31:03	-16.314	-71.578	34.9	3.1	3.41E+14	0.50	1.22	3.69	3.80
79	01/07/01	19:39:22	-16.718	-74.008	1.0	2.8	6.84E+14	0.59	1.47	3.89	3.88
80	01/07/01	20:14:36	-17.505	-72.570	30.0	3.3	3.04E+15	0.42	17.49	4.32	4.04
81	01/07/01	21:32:53	-16.631	-70.672	24.9	2.7	3.56E+15	0.52	11.44	4.37	4.06
82	01/07/01	22:04:51	-16.492	-73.529	31.7	2.8	6.67E+13	0.24	2.22	3.22	3.61
83	02/07/01	00:44:02	-16.949	-73.853	3.2	2.9	1.71E+14	0.44	0.86	3.49	3.72
84	02/07/01	01:15:41	-16.486	-73.380	44.7	3.0	9.91E+13	0.21	4.98	3.33	3.66
86	02/07/01	03:00:47	-17.103	-72.315	3.4	2.4	2.27E+14	0.23	8.10	3.57	3.75
87	02/07/01	03:07:02	-16.477	-73.389	39.2	3.1	5.91E+13	0.26	1.40	3.18	3.60
90	02/07/01	04:29:51	-16.466	-73.499	47.9	3.8	7.60E+13	0.29	1.39	3.25	3.63
93	02/07/01	05:29:58	-16.422	-73.531	4.0	2.5	2.15E+14	0.22	8.64	3.55	3.75
94	02/07/01	05:49:38	-16.817	-72.637	10.5	3.2	1.52E+14	0.24	4.82	3.46	3.71
95	02/07/01	06:40:25	-16.297	-73.836	39.3	3.0	4.39E+13	0.23	1.57	3.10	3.57
96	02/07/01	07:40:42	-17.316	-72.803	5.1	3.3	5.17E+14	0.24	16.36	3.81	3.84
98	02/07/01	09:25:02	-15.878	-72.700	10.5	3.3	1.41E+14	0.22	5.65	3.43	3.70
99	02/07/01	09:49:34	-16.366	-73.629	30.3	3.1	1.28E+14	0.22	5.16	3.41	3.69
100	02/07/01	11:59:19	-15.218	-74.048	0.5	2.9	3.33E+14	0.21	15.00	3.68	3.79
101	02/07/01	14:07:33	-16.509	-73.661	42.1	3.3	3.42E+14	0.20	17.55	3.69	3.80
102	02/07/01	14:38:30	-16.503	-73.667	47.0	3.6	8.16E+13	0.23	2.92	3.27	3.64
103	02/07/01	18:23:32	-16.329	-73.614	14.3	3.0	3.08E+14	0.22	13.25	3.66	3.79
104	02/07/01	18:31:56	-16.795	-74.050	16.0	2.8	3.55E+14	0.49	1.33	3.70	3.80
106	02/07/01	20:47:21	-16.512	-73.486	32.7	3.2	4.92E+13	0.21	2.22	3.13	3.58
107	02/07/01	22:05:40	-16.618	-73.276	41.0	3.0	1.04E+14	0.24	3.28	3.34	3.66
108	02/07/01	23:10:03	-15.967	-74.629	17.5	2.8	4.40E+14	0.50	1.57	3.76	3.83

Tabla 1. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
109	03/07/01	00:33:47	-17.112	-73.341	9.1	4.5	3.16E+14	0.35	3.19	3.67	3.79
110	03/07/01	01:08:55	-17.079	-72.680	29.0	3.0	1.31E+15	0.22	52.66	4.08	3.95
111	03/07/01	02:00:37	-16.464	-73.507	32.6	3.3	1.08E+14	0.21	4.85	3.35	3.67
113	03/07/01	03:58:10	-16.525	-73.666	25.4	3.5	1.50E+14	0.23	5.77	3.45	3.71
114	03/07/01	04:06:25	-16.468	-73.558	28.2	2.7	2.40E+14	0.29	4.52	3.59	3.76
115	03/07/01	04:38:39	-16.333	-73.707	15.2	3.6	1.17E+14	0.38	0.90	3.38	3.68
116	03/07/01	05:12:57	-16.515	-73.444	36.2	3.2	6.89E+13	0.23	2.40	3.23	3.62
117	03/07/01	05:58:48	-17.155	-72.252	0.5	2.9	3.09E+14	0.34	3.48	3.66	3.79
119	03/07/01	06:54:13	-17.116	-72.870	11.9	3.3	3.52E+14	0.27	7.45	3.70	3.80
122	03/07/01	08:07:48	-16.485	-73.660	22.6	3.2	3.42E+13	0.21	1.54	3.02	3.54
123	03/07/01	08:31:32	-17.189	-72.761	24.3	3.3	2.50E+14	0.37	2.18	3.60	3.76
125	03/07/01	08:52:54	-16.338	-73.856	13.6	2.9	1.88E+14	0.24	5.65	3.52	3.73
126	03/07/01	09:36:40	-16.573	-73.486	22.0	3.1	6.51E+13	0.19	4.02	3.21	3.61
128	03/07/01	17:40:47	-17.028	-72.541	21.7	3.5	1.84E+14	0.26	4.49	3.51	3.73
129	03/07/01	18:57:23	-16.370	-73.988	7.7	2.8	8.97E+15	0.40	63.84	4.64	4.16
131	03/07/01	21:32:50	-16.877	-74.064	1.4	2.5	1.07E+15	0.42	6.44	4.02	3.92
132	03/07/01	23:53:34	-16.465	-73.710	17.8	3.1	1.54E+15	0.22	66.10	4.12	3.96
133	04/07/01	02:32:41	-16.955	-72.813	21.9	2.8	1.47E+14	0.23	5.52	3.45	3.70
134	04/07/01	02:59:21	-16.534	-73.423	32.3	2.8	1.09E+14	0.24	3.43	3.36	3.67
136	04/07/01	04:54:16	-16.994	-72.819	10.0	2.7	6.51E+14	0.33	8.12	3.88	3.87
137	04/07/01	05:09:48	-16.534	-73.512	37.1	3.0	3.09E+13	0.23	1.11	2.99	3.53
138	04/07/01	05:25:19	-16.502	-73.378	40.5	2.8	4.66E+13	0.22	1.96	3.11	3.57
141	04/07/01	06:01:18	-16.446	-73.357	34.9	3.2	3.48E+13	0.20	1.94	3.03	3.54
142	04/07/01	06:20:12	-16.542	-73.661	22.1	3.4	3.03E+13	0.23	1.16	2.99	3.52
143	04/07/01	07:49:58	-16.526	-73.688	30.8	2.9	6.59E+13	0.22	2.77	3.21	3.61
145	04/07/01	08:36:44	-16.499	-73.691	22.2	3.3	4.49E+13	0.25	1.25	3.10	3.57
147	04/07/01	10:33:01	-16.005	-72.731	6.1	3.4	4.55E+13	0.21	2.05	3.11	3.57
149	04/07/01	11:44:41	-16.451	-73.749	15.5	3.5	1.61E+14	0.26	4.04	3.47	3.71
150	04/07/01	13:02:28	-15.815	-72.834	8.1	3.5	1.86E+14	0.23	6.66	3.51	3.73
152	04/07/01	17:19:04	-16.555	-73.781	16.3	3.8	1.11E+14	0.21	5.02	3.36	3.67
153	04/07/01	17:22:07	-15.878	-73.062	19.4	3.5	7.56E+13	0.22	2.97	3.25	3.63
154	04/07/01	17:36:15	-17.131	-73.320	19.9	3.2	7.66E+14	0.38	6.15	3.92	3.89
155	04/07/01	18:10:06	-16.450	-73.713	22.5	3.0	1.57E+14	0.21	7.89	3.46	3.71
158	04/07/01	20:59:40	-15.421	-72.898	8.2	3.0	3.74E+14	0.40	2.66	3.72	3.81
159	04/07/01	22:02:19	-16.502	-73.761	22.6	3.1	3.48E+14	0.34	3.92	3.69	3.80
160	05/07/01	00:40:27	-16.504	-73.650	25.4	3.1	8.58E+13	0.29	1.57	3.29	3.64
161	05/07/01	01:23:05	-17.201	-72.653	4.8	3.2	2.21E+15	0.33	26.66	4.23	4.01
162	05/07/01	01:39:22	-17.231	-72.728	0.4	2.9	1.29E+15	0.37	11.18	4.07	3.95
163	05/07/01	02:38:48	-16.369	-73.532	32.9	3.6	2.64E+14	0.21	13.24	3.61	3.77
164	05/07/01	02:54:32	-16.593	-72.928	55.1	3.5	7.21E+13	0.25	2.11	3.24	3.62

Tabla 1. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
166	05/07/01	03:58:19	-16.586	-73.448	21.8	3.5	3.67E+13	0.23	1.31	3.04	3.55
167	05/07/01	04:26:59	-16.499	-73.567	21.2	3.3	9.44E+13	0.26	2.30	3.32	3.65
168	05/07/01	04:54:23	-16.955	-72.903	16.6	3.0	1.35E+14	0.21	6.10	3.42	3.69
169	05/07/01	05:26:42	-16.325	-73.739	17.6	3.3	1.62E+14	0.21	7.30	3.47	3.71
170	05/07/01	05:41:13	-17.144	-73.302	12.0	2.7	3.80E+14	0.37	3.43	3.72	3.81
172	05/07/01	07:46:58	-14.984	-73.833	31.3	2.8	4.52E+14	0.40	3.22	3.77	3.83
173	05/07/01	08:19:31	-16.429	-73.113	42.9	2.8	3.36E+14	0.19	22.01	3.68	3.80
174	05/07/01	08:38:48	-16.345	-73.976	11.7	3.0	8.27E+14	0.26	19.59	3.94	3.90
175	05/07/01	12:03:01	-16.460	-73.449	27.8	2.8	5.52E+15	0.30	86.65	4.49	4.11
176	05/07/01	15:23:56	-16.135	-73.748	56.8	3.2	2.52E+14	0.19	15.57	3.60	3.76
177	05/07/01	15:31:21	-16.377	-73.777	24.6	3.1	1.02E+14	0.23	3.66	3.34	3.66
178	05/07/01	16:44:09	-16.489	-73.633	47.2	3.7	1.27E+15	0.24	40.12	4.07	3.94
179	05/07/01	17:18:14	-16.494	-73.228	40.5	2.7	3.94E+13	0.25	1.10	3.06	3.55
180	05/07/01	18:09:06	-17.026	-72.746	18.8	4.1	4.13E+15	0.28	80.20	4.41	4.07
181	05/07/01	19:31:38	-16.447	-73.476	29.0	3.0	4.22E+13	0.19	2.61	3.08	3.56
182	05/07/01	20:04:02	-16.863	-72.950	18.0	2.9	4.93E+13	0.22	2.07	3.13	3.58
183	05/07/01	22:02:40	-16.474	-73.558	19.6	3.6	1.32E+14	0.20	7.38	3.41	3.69
184	05/07/01	22:43:16	-16.431	-73.601	17.7	3.2	1.26E+14	0.21	6.34	3.40	3.69
185	05/07/01	22:59:05	-16.435	-73.419	33.2	3.1	2.17E+14	0.21	9.79	3.56	3.75
186	05/07/01	23:06:37	-16.510	-73.421	27.0	2.7	3.20E+13	0.20	1.78	3.00	3.53
188	06/07/01	00:49:32	-17.291	-72.247	10.1	2.9	7.89E+14	0.24	24.97	3.93	3.89
189	06/07/01	00:56:08	-16.487	-73.469	29.8	2.9	5.87E+13	0.23	2.25	3.18	3.60
190	06/07/01	01:07:16	-17.410	-71.305	15.7	2.7	1.03E+15	0.37	8.98	4.01	3.92
191	06/07/01	01:32:37	-16.501	-73.368	36.0	3.0	3.04E+13	0.30	0.48	2.99	3.52
192	06/07/01	01:40:15	-16.388	-73.436	35.0	2.4	8.55E+13	0.22	3.76	3.29	3.64
193	06/07/01	01:43:58	-15.353	-73.658	51.8	3.0	3.16E+14	0.37	2.75	3.67	3.79
195	06/07/01	02:54:04	-16.574	-73.591	27.2	3.2	1.13E+14	0.23	4.03	3.37	3.67
196	06/07/01	03:11:49	-16.507	-73.666	31.2	3.1	3.62E+13	0.27	0.77	3.04	3.54
197	06/07/01	03:41:41	-16.978	-73.569	15.4	4.5	1.36E+14	0.37	1.18	3.42	3.69
198	06/07/01	03:58:10	-16.573	-73.698	21.0	2.9	6.39E+13	0.26	1.69	3.20	3.61
199	06/07/01	05:01:50	-15.474	-72.833	7.4	3.9	1.43E+13	0.22	0.57	2.77	3.44
201	06/07/01	06:59:39	-15.682	-73.432	13.6	3.4	1.54E+14	0.29	2.81	3.46	3.71
202	06/07/01	08:08:34	-16.469	-73.566	27.8	3.1	9.02E+13	0.22	3.63	3.30	3.65
203	06/07/01	08:12:25	-16.573	-73.543	27.5	2.9	1.20E+14	0.21	5.39	3.39	3.68
204	06/07/01	08:19:38	-16.948	-72.871	10.7	2.7	4.16E+13	0.22	1.67	3.08	3.56
206	06/07/01	08:41:09	-17.969	-71.521	30.6	3.0	1.28E+15	0.38	10.28	4.07	3.94
207	06/07/01	08:48:29	-16.800	-73.629	41.4	3.5	2.45E+13	0.25	0.68	2.93	3.50
208	06/07/01	09:22:00	-16.441	-73.551	30.0	3.0	1.49E+16	0.48	58.95	4.78	4.21
209	06/07/01	09:54:37	-16.483	-73.476	29.0	3.3	7.18E+13	0.23	2.57	3.24	3.62
210	06/07/01	12:11:55	-16.965	-72.562	32.2	3.5	7.06E+13	0.25	2.02	3.23	3.62

Tabla 1. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
211	06/07/01	13:11:16	-16.468	-73.515	29.0	3.1	6.27E+13	0.19	3.87	3.20	3.61
212	06/07/01	14:50:00	-16.488	-73.741	25.8	3.0	3.88E+13	0.23	1.39	3.06	3.55
213	06/07/01	15:16:18	-16.858	-73.925	10.1	3.4	1.20E+14	0.36	1.12	3.39	3.68
214	06/07/01	15:26:59	-16.445	-73.583	18.7	3.4	9.40E+13	0.24	2.97	3.32	3.65
215	06/07/01	17:57:29	-17.651	-72.294	2.4	3.0	2.53E+14	0.30	4.10	3.60	3.76
216	06/07/01	19:45:17	-16.884	-72.888	19.1	3.3	3.07E+13	0.21	1.38	2.99	3.53
217	06/07/01	19:56:34	-17.261	-72.517	35.0	3.5	1.21E+15	0.29	22.19	4.06	3.94
218	06/07/01	19:59:51	-17.165	-73.417	14.0	3.0	1.74E+14	0.28	3.48	3.49	3.72
219	06/07/01	20:49:16	-16.430	-73.654	16.5	3.6	4.87E+13	0.22	1.96	3.12	3.58
220	06/07/01	22:29:25	-16.489	-73.557	21.4	3.3	7.77E+13	0.25	2.16	3.26	3.63
222	07/07/01	02:48:03	-17.027	-72.654	17.0	3.3	1.32E+14	0.24	3.97	3.41	3.69
223	07/07/01	02:58:30	-16.306	-73.876	13.1	3.3	1.47E+14	0.21	7.36	3.44	3.70
224	07/07/01	03:10:54	-16.857	-73.792	14.1	4.8	6.44E+14	0.50	2.30	3.87	3.87
225	07/07/01	03:13:07	-17.041	-72.224	16.2	4.4	3.12E+14	0.29	5.71	3.66	3.79
226	07/07/01	05:05:43	-16.381	-73.612	41.4	4.3	3.62E+13	0.21	1.82	3.04	3.54
227	07/07/01	05:19:43	-16.414	-73.878	22.7	3.9	7.43E+15	0.38	57.36	4.58	4.14
228	07/07/01	05:28:39	-17.083	-72.866	8.9	4.0	1.21E+14	0.24	3.83	3.39	3.68
230	07/07/01	07:47:23	-16.427	-73.389	48.5	3.8	1.27E+14	0.21	6.40	3.40	3.69
231	07/07/01	07:50:04	-16.454	-73.624	32.7	2.7	1.45E+14	0.21	6.68	3.44	3.70
233	07/07/01	11:49:24	-16.338	-71.689	32.9	3.1	1.15E+16	0.58	26.26	4.71	4.19
234	07/07/01	11:55:59	-16.683	-71.466	12.2	4.1	3.83E+15	0.36	35.85	4.39	4.07
235	07/07/01	13:31:05	-17.576	-72.070	22.9	3.7	1.90E+15	0.42	10.96	4.19	3.99
236	07/07/01	13:36:18	-17.826	-72.082	23.6	4.4	2.76E+15	0.37	23.05	4.29	4.03
237	07/07/01	15:24:17	-17.780	-72.165	15.5	3.8	4.75E+15	0.38	36.66	4.45	4.09
240	07/07/01	16:22:30	-16.230	-73.610	44.4	3.6	1.84E+14	0.21	8.27	3.51	3.73
241	07/07/01	17:04:20	-18.037	-72.247	10.7	3.3	2.88E+15	0.41	18.11	4.31	4.03
242	07/07/01	17:37:28	-16.404	-71.702	5.3	3.6	8.08E+14	0.29	15.24	3.94	3.89
243	07/07/01	19:29:55	-17.877	-72.225	2.9	4.0	9.25E+15	0.48	36.58	4.64	4.16
244	07/07/01	21:24:54	-17.794	-72.153	12.7	3.3	8.63E+14	0.36	8.09	3.96	3.90
246	07/07/01	22:15:10	-16.942	-71.347	30.1	3.9	8.52E+14	0.26	20.76	3.95	3.90
247	08/07/01	00:15:13	-16.483	-73.524	37.0	3.5	3.08E+13	0.21	1.39	2.99	3.53
248	08/07/01	01:25:26	-16.524	-73.490	24.5	2.8	9.07E+13	0.21	4.56	3.31	3.65
249	08/07/01	01:38:41	-16.799	-71.692	30.8	2.8	3.21E+14	0.26	7.82	3.67	3.79
251	08/07/01	03:56:57	-14.550	-73.729	24.2	3.0	1.71E+14	0.21	8.61	3.49	3.72
252	08/07/01	04:09:34	-17.694	-72.389	28.5	3.6	1.27E+15	0.30	19.98	4.07	3.94
253	08/07/01	05:27:48	-16.345	-71.272	18.5	3.6	8.74E+14	0.32	11.67	3.96	3.90
257	08/07/01	07:48:32	-16.332	-73.296	39.8	4.2	3.91E+13	0.24	1.24	3.06	3.55
258	08/07/01	08:03:45	-17.259	-71.606	34.8	3.3	8.02E+14	0.29	14.67	3.94	3.89
259	08/07/01	08:23:06	-14.539	-71.468	19.1	2.9	8.64E+14	0.32	11.53	3.96	3.90
261	08/07/01	09:19:31	-17.503	-71.838	38.0	3.2	1.10E+15	0.27	23.25	4.03	3.93

Tabla 1. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
262	08/07/01	11:18:02	-17.422	-72.725	4.0	3.1	3.82E+14	0.20	21.33	3.72	3.81
263	08/07/01	11:19:45	-16.690	-72.850	20.6	3.1	1.78E+14	0.23	6.82	3.50	3.72
264	08/07/01	11:21:45	-17.846	-72.116	7.2	4.2	1.24E+15	0.41	7.80	4.06	3.94
265	08/07/01	11:28:25	-16.765	-73.839	4.8	3.7	4.39E+14	0.26	10.69	3.76	3.83
268	08/07/01	20:03:24	-17.414	-72.064	29.2	3.4	6.08E+15	0.37	52.79	4.52	4.12
269	08/07/01	21:15:21	-16.840	-72.690	10.6	2.7	2.99E+15	0.28	59.75	4.32	4.04
270	08/07/01	23:32:23	-16.492	-73.474	44.7	2.8	2.76E+14	0.21	12.44	3.63	3.77
271	09/07/01	02:39:14	-16.886	-72.646	13.3	2.8	1.42E+14	0.22	5.73	3.44	3.70
272	09/07/01	02:43:13	-16.995	-72.735	41.6	3.7	1.11E+14	0.26	2.72	3.36	3.67
274	09/07/01	06:07:09	-16.321	-73.728	12.9	3.6	4.59E+13	0.21	2.30	3.11	3.57
276	09/07/01	14:15:03	-16.304	-70.328	36.8	4.1	5.63E+15	0.36	52.79	4.50	4.11
277	09/07/01	14:59:06	-16.889	-72.199	3.1	2.9	2.20E+15	0.23	78.49	4.23	4.00
278	09/07/01	17:56:39	-16.453	-73.498	28.3	3.5	1.01E+14	0.20	5.61	3.33	3.66
279	09/07/01	19:05:17	-17.625	-71.993	23.4	3.8	3.55E+15	0.36	33.28	4.37	4.06
281	09/07/01	23:39:21	-17.334	-72.635	11.0	3.8	2.50E+14	0.22	10.07	3.60	3.76
282	10/07/01	03:23:59	-16.461	-70.395	16.2	4.4	5.07E+15	0.61	9.64	4.47	4.10
283	10/07/01	03:51:22	-16.599	-73.499	26.0	3.4	2.10E+13	0.23	0.75	2.88	3.48
284	10/07/01	05:14:00	-17.766	-72.249	5.3	2.9	1.60E+15	0.37	13.88	4.14	3.97
286	10/07/01	17:18:59	-16.579	-73.520	32.6	3.1	9.86E+13	0.24	3.12	3.33	3.66
288	10/07/01	21:33:16	-16.037	-72.819	11.0	3.8	6.43E+14	0.25	18.85	3.87	3.87
289	11/07/01	01:28:02	-16.419	-72.768	20.3	3.2	1.39E+13	0.23	0.53	2.76	3.43
290	11/07/01	06:10:00	-17.951	-71.813	2.8	3.1	1.43E+15	0.29	26.26	4.10	3.96
291	11/07/01	07:08:06	-16.598	-72.753	27.6	3.2	2.68E+14	0.21	13.47	3.62	3.77
292	11/07/01	09:08:53	-16.628	-74.024	7.0	3.0	1.62E+14	0.34	1.88	3.47	3.71

Tabla 2. Parámetros de la fuente sísmica de réplicas de la estación Caravelí

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
3	28/06/01	07:50:49	-16.353	-73.836	5.6	2.9	6.54E+13	0.32	0.87	3.21	3.61
4	28/06/01	08:25:07	-16.413	-73.684	21.3	3.0	5.95E+14	0.32	7.94	3.85	3.86
6	28/06/01	12:05:21	-16.469	-73.288	59.5	3.0	6.45E+13	0.36	0.60	3.21	3.61
7	28/06/01	12:20:46	-15.877	-74.479	29.2	2.5	4.97E+14	0.45	2.39	3.80	3.84
9	28/06/01	23:18:19	-16.529	-73.872	28.1	4.6	8.25E+14	0.51	2.80	3.94	3.90
11	29/06/01	00:21:43	-16.387	-73.916	8.9	3.3	2.17E+14	0.48	0.86	3.56	3.75
12	29/06/01	06:03:30	-16.399	-73.465	33.1	2.8	1.03E+14	0.30	1.61	3.34	3.66
13	29/06/01	06:16:56	-16.439	-73.389	36.2	3.1	4.90E+13	0.26	1.19	3.13	3.58
14	29/06/01	06:23:36	-16.466	-73.651	18.4	2.9	6.17E+13	0.33	0.77	3.19	3.60
15	29/06/01	06:45:18	-17.101	-73.865	3.3	3.0	7.23E+14	0.37	6.28	3.91	3.88
16	29/06/01	07:10:34	-16.545	-73.653	34.8	3.7	5.15E+13	0.36	0.48	3.14	3.58
17	29/06/01	08:04:36	-16.976	-73.705	9.9	2.8	1.83E+14	0.37	1.59	3.51	3.73
18	29/06/01	08:16:39	-16.795	-72.859	19.7	2.8	8.45E+13	0.41	0.53	3.28	3.64
20	29/06/01	10:27:03	-16.480	-73.528	21.5	2.8	4.95E+14	0.41	3.11	3.80	3.84
22	29/06/01	11:54:09	-16.369	-73.772	5.8	3.1	4.22E+14	0.32	5.63	3.75	3.82
23	29/06/01	11:57:58	-18.184	-71.710	13.7	2.8	2.13E+16	0.58	48.73	4.89	4.25
24	29/06/01	12:19:54	-16.406	-73.741	13.9	3.6	5.99E+13	0.27	1.27	3.19	3.60
25	29/06/01	14:36:23	-16.829	-72.928	18.6	2.8	1.18E+15	0.40	8.43	4.05	3.94
27	29/06/01	14:57:46	-16.502	-73.501	21.9	3.9	1.46E+14	0.35	1.53	3.44	3.70
28	29/06/01	16:35:52	-16.078	-74.569	13.8	2.8	3.61E+15	0.38	27.84	4.37	4.06
29	29/06/01	16:42:41	-16.480	-73.460	26.1	3.2	4.95E+14	0.37	4.30	3.80	3.84
30	29/06/01	16:58:42	-16.085	-74.549	19.8	4.8	3.04E+15	0.44	15.27	4.32	4.04
31	29/06/01	18:01:59	-16.526	-73.498	30.1	2.7	5.94E+14	0.35	5.99	3.85	3.86
32	29/06/01	22:33:19	-18.448	-71.519	9.4	3.0	1.63E+17	3.61	1.53	5.48	4.47
33	29/06/01	22:56:07	-16.445	-73.641	20.0	4.3	7.66E+14	0.34	8.61	3.92	3.89
34	29/06/01	22:56:50	-16.308	-73.859	11.3	3.0	8.56E+14	0.36	8.02	3.95	3.90
38	30/06/01	02:54:42	-16.302	-74.055	18.9	2.5	2.31E+14	0.31	3.41	3.58	3.75
39	30/06/01	04:26:00	-17.188	-73.499	19.0	2.8	1.46E+14	0.47	0.64	3.44	3.70
40	30/06/01	05:05:57	-16.681	-73.304	26.9	2.8	1.31E+14	0.41	0.82	3.41	3.69
41	30/06/01	06:20:12	-16.380	-73.857	32.1	3.0	3.64E+13	0.34	0.41	3.04	3.54
42	30/06/01	07:43:14	-16.486	-73.526	24.2	3.1	6.14E+13	0.34	0.69	3.19	3.60
43	30/06/01	07:51:12	-16.693	-74.010	3.3	2.8	4.91E+14	0.36	4.77	3.79	3.84
44	30/06/01	08:34:48	-16.454	-73.555	13.9	2.8	7.36E+13	0.35	0.74	3.24	3.62
45	30/06/01	08:50:45	-16.933	-73.513	11.6	2.8	1.03E+14	0.34	1.12	3.34	3.66
46	30/06/01	11:11:00	-16.448	-73.682	24.8	3.2	1.14E+14	0.31	1.73	3.37	3.67
47	30/06/01	11:32:25	-16.379	-73.847	23.4	3.0	7.59E+13	0.29	1.31	3.25	3.63
49	30/06/01	13:46:14	-16.543	-73.641	34.0	3.0	7.65E+13	0.48	0.30	3.26	3.63
50	30/06/01	14:46:39	-16.417	-73.465	43.6	3.4	6.68E+13	0.26	1.72	3.22	3.61
52	30/06/01	16:31:30	-16.797	-72.955	25.8	2.7	1.40E+14	0.34	1.58	3.43	3.70
53	30/06/01	18:58:41	-16.405	-73.435	20.6	3.0	9.73E+13	0.32	1.30	3.33	3.66

Tabla 2. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
55	30/06/01	23:25:56	-16.898	-73.696	0.3	3.7	1.71E+14	0.37	1.49	3.49	3.72
56	01/07/01	00:18:14	-16.295	-74.088	5.2	3.2	1.81E+15	0.35	18.97	4.17	3.98
58	01/07/01	02:32:14	-15.825	-74.605	35.4	3.0	3.70E+13	0.28	0.72	3.05	3.55
60	01/07/01	07:01:03	-16.474	-73.623	42.7	3.1	1.96E+14	0.32	2.62	3.53	3.74
62	01/07/01	09:14:55	-15.937	-72.702	17.1	4.7	3.60E+13	0.24	1.08	3.04	3.54
63	01/07/01	09:24:02	-16.320	-74.022	14.5	2.7	2.01E+14	0.28	4.02	3.54	3.74
64	01/07/01	09:54:20	-16.476	-73.456	42.0	3.5	5.88E+13	0.33	0.71	3.18	3.60
65	01/07/01	10:13:10	-17.493	-72.285	28.1	3.8	1.79E+15	0.42	10.30	4.17	3.98
66	01/07/01	10:15:28	-16.534	-73.499	32.2	2.8	1.33E+14	0.45	0.64	3.42	3.69
67	01/07/01	10:46:51	-15.965	-74.773	18.3	3.0	9.29E+14	0.42	5.35	3.98	3.91
68	01/07/01	11:06:28	-17.376	-73.427	0.7	3.3	1.58E+17	1.15	45.09	5.47	4.47
69	01/07/01	11:46:59	-16.080	-73.587	26.7	3.1	1.31E+14	0.40	0.93	3.41	3.69
70	01/07/01	12:16:57	-16.475	-73.481	0.2	3.0	1.98E+15	0.41	12.45	4.20	3.99
72	01/07/01	12:59:33	-16.276	-74.079	46.9	3.2	1.83E+14	0.29	3.15	3.51	3.73
73	01/07/01	12:59:58	-16.210	-74.038	43.0	3.1	2.07E+14	0.38	1.59	3.54	3.74
74	01/07/01	13:03:47	-16.474	-73.477	38.6	3.9	5.21E+14	0.36	4.88	3.81	3.84
75	01/07/01	13:38:48	-16.341	-74.016	17.3	4.0	3.19E+14	0.29	5.83	3.67	3.79
76	01/07/01	14:52:44	-16.468	-73.806	46.8	3.0	2.56E+14	0.38	2.06	3.61	3.77
77	01/07/01	15:28:19	-16.344	-74.072	30.0	3.0	2.34E+15	0.31	34.42	4.25	4.01
78	01/07/01	15:31:03	-16.314	-71.578	34.9	3.1	4.41E+14	0.57	1.07	3.76	3.83
79	01/07/01	19:39:22	-16.718	-74.008	1.0	2.8	9.98E+14	0.58	2.28	4.00	3.92
80	01/07/01	20:14:36	-17.505	-72.570	30.0	3.3	2.11E+15	0.52	6.77	4.22	4.00
81	01/07/01	21:32:53	-16.631	-70.672	24.9	2.7	6.60E+15	0.64	11.00	4.55	4.12
82	01/07/01	22:04:51	-16.492	-73.529	31.7	2.8	8.10E+13	0.27	1.87	3.27	3.64
83	02/07/01	00:44:02	-16.949	-73.853	3.2	2.9	1.86E+14	0.38	1.43	3.51	3.73
84	02/07/01	01:15:41	-16.486	-73.380	44.7	3.0	1.68E+14	0.24	5.31	3.48	3.72
86	02/07/01	03:00:47	-17.103	-72.315	3.4	2.4	2.47E+14	0.42	1.42	3.60	3.76
87	02/07/01	03:07:02	-16.477	-73.389	39.2	3.1	3.46E+13	0.32	0.46	3.03	3.54
88	02/07/01	03:26:49	-16.529	-74.132	10.8	3.4	2.04E+14	0.33	2.55	3.54	3.74
90	02/07/01	04:29:51	-16.466	-73.499	47.9	3.8	6.65E+13	0.29	1.22	3.22	3.61
91	02/07/01	05:09:27	-16.391	-73.862	9.0	3.2	4.64E+13	0.29	0.88	3.11	3.57
93	02/07/01	05:29:58	-16.422	-73.531	4.0	2.5	1.97E+14	0.29	3.60	3.53	3.74
94	02/07/01	05:49:38	-16.817	-72.637	10.5	3.2	1.64E+15	0.40	11.23	4.14	3.97
95	02/07/01	06:40:25	-16.297	-73.836	39.3	3.0	4.01E+13	0.36	0.38	3.07	3.56
96	02/07/01	07:40:42	-17.316	-72.803	5.1	3.3	8.39E+14	0.46	3.84	3.95	3.90
97	02/07/01	09:00:40	-16.812	-72.559	9.5	2.9	1.73E+14	0.40	1.19	3.49	3.72
98	02/07/01	09:25:02	-15.878	-72.700	10.5	3.3	1.30E+14	0.38	1.00	3.41	3.69
99	02/07/01	09:49:34	-16.366	-73.629	30.3	3.1	8.23E+13	0.27	1.74	3.28	3.64
100	02/07/01	11:59:19	-15.218	-74.048	0.5	2.9	8.81E+13	0.34	0.99	3.30	3.65
101	02/07/01	14:07:33	-16.509	-73.661	42.1	3.3	6.41E+14	0.30	10.07	3.87	3.87

Tabla 2. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
102	02/07/01	14:38:30	-16.503	-73.667	47.0	3.6	1.18E+14	0.33	1.47	3.38	3.68
103	02/07/01	18:23:32	-16.329	-73.614	14.3	3.0	1.82E+14	0.27	3.86	3.51	3.73
104	02/07/01	18:31:56	-16.795	-74.050	16.0	2.8	3.42E+14	0.41	2.15	3.69	3.80
106	02/07/01	20:47:21	-16.512	-73.486	32.7	3.2	2.36E+13	0.27	0.54	2.91	3.50
107	02/07/01	22:05:40	-16.618	-73.276	41.0	3.0	9.50E+13	0.32	1.27	3.32	3.65
108	02/07/01	23:10:03	-15.967	-74.629	17.5	2.8	3.72E+14	0.40	2.54	3.71	3.81
110	03/07/01	01:08:55	-17.079	-72.680	29.0	3.0	1.53E+15	0.32	20.44	4.12	3.96
111	03/07/01	02:00:37	-16.464	-73.507	32.6	3.3	7.83E+13	0.32	1.04	3.26	3.63
112	03/07/01	03:35:05	-16.517	-73.728	41.5	3.3	5.30E+13	0.31	0.78	3.15	3.59
113	03/07/01	03:58:10	-16.525	-73.666	25.4	3.5	1.84E+14	0.40	1.26	3.51	3.73
114	03/07/01	04:06:25	-16.468	-73.558	28.2	2.7	1.09E+15	0.26	26.44	4.02	3.93
115	03/07/01	04:38:39	-16.333	-73.707	15.2	3.6	3.91E+13	0.25	1.09	3.06	3.55
116	03/07/01	05:12:57	-16.515	-73.444	36.2	3.2	2.03E+13	0.26	0.49	2.87	3.48
117	03/07/01	05:58:48	-17.155	-72.252	0.5	2.9	3.88E+14	0.38	3.00	3.73	3.81
118	03/07/01	06:02:15	-17.035	-72.663	18.7	3.0	1.06E+14	0.29	1.94	3.35	3.67
120	03/07/01	07:28:43	-16.533	-73.608	41.7	3.3	5.15E+13	0.26	1.25	3.14	3.58
121	03/07/01	07:32:12	-17.161	-71.936	10.0	3.2	5.52E+14	0.41	3.47	3.83	3.85
122	03/07/01	08:07:48	-16.485	-73.660	22.6	3.2	4.08E+13	0.38	0.31	3.07	3.56
123	03/07/01	08:31:32	-17.189	-72.761	24.3	3.3	1.82E+14	0.38	1.46	3.51	3.73
124	03/07/01	08:34:27	-16.108	-73.520	59.3	3.4	1.70E+13	0.25	0.47	2.82	3.46
125	03/07/01	08:52:54	-16.338	-73.856	13.6	2.9	7.73E+13	0.30	1.21	3.26	3.63
126	03/07/01	09:36:40	-16.573	-73.486	22.0	3.1	6.10E+13	0.30	0.96	3.19	3.60
129	03/07/01	18:57:23	-16.370	-73.988	7.7	2.8	7.54E+14	0.30	11.84	3.92	3.89
130	03/07/01	19:32:16	-16.273	-73.983	57.8	2.5	9.65E+13	0.27	2.22	3.32	3.66
131	03/07/01	21:32:50	-16.877	-74.064	1.4	2.5	1.33E+15	0.48	5.26	4.08	3.95
132	03/07/01	23:53:34	-16.465	-73.710	17.8	3.1	1.50E+15	0.38	11.57	4.12	3.96
133	04/07/01	02:32:41	-16.955	-72.813	21.9	2.8	5.79E+13	0.41	0.36	3.18	3.60
134	04/07/01	02:59:21	-16.534	-73.423	32.3	2.8	1.20E+14	0.26	2.92	3.39	3.68
135	04/07/01	04:21:50	-16.267	-73.638	48.3	3.1	1.35E+13	0.27	0.29	2.75	3.43
136	04/07/01	04:54:16	-16.994	-72.819	10.0	2.7	3.72E+14	0.38	2.88	3.71	3.81
137	04/07/01	05:09:48	-16.534	-73.512	37.1	3.0	1.23E+14	0.27	2.62	3.39	3.68
138	04/07/01	05:25:19	-16.502	-73.378	40.5	2.8	1.55E+13	0.24	0.49	2.79	3.45
139	04/07/01	05:28:19	-16.124	-73.064	3.7	3.0	2.76E+13	0.38	0.21	2.96	3.51
140	04/07/01	05:59:04	-16.520	-73.542	30.5	2.9	2.15E+13	0.27	0.45	2.89	3.48
141	04/07/01	06:01:18	-16.446	-73.357	34.9	3.2	1.42E+13	0.21	0.64	2.77	3.44
142	04/07/01	06:20:12	-16.542	-73.661	22.1	3.4	4.33E+13	0.30	0.68	3.09	3.56
143	04/07/01	07:49:58	-16.526	-73.688	30.8	2.9	1.14E+14	0.31	1.62	3.37	3.67
145	04/07/01	08:36:44	-16.499	-73.691	22.2	3.3	4.19E+13	0.34	0.47	3.08	3.56
146	04/07/01	09:01:09	-16.087	-72.636	51.3	3.0	1.88E+13	0.29	0.34	2.85	3.47
147	04/07/01	10:33:01	-16.005	-72.731	6.1	3.4	3.49E+13	0.34	0.39	3.03	3.54

Tabla 2. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
148	04/07/01	10:38:57	-16.032	-72.786	7.9	3.0	5.64E+13	0.32	0.75	3.17	3.59
149	04/07/01	11:44:41	-16.451	-73.749	15.5	3.5	4.04E+14	0.26	9.85	3.74	3.82
150	04/07/01	13:02:28	-15.815	-72.834	8.1	3.5	1.26E+14	0.36	1.19	3.40	3.69
152	04/07/01	17:19:04	-16.555	-73.781	16.3	3.8	1.96E+14	0.34	2.21	3.53	3.74
153	04/07/01	17:22:07	-15.878	-73.062	19.4	3.5	8.13E+13	0.28	1.63	3.27	3.64
154	04/07/01	17:36:15	-17.131	-73.320	19.9	3.2	3.60E+14	0.40	2.46	3.70	3.80
155	04/07/01	18:10:06	-16.450	-73.713	22.5	3.0	1.61E+14	0.29	2.95	3.47	3.71
158	04/07/01	20:59:40	-15.421	-72.898	8.2	3.0	5.12E+14	0.38	4.12	3.81	3.84
159	04/07/01	22:02:19	-16.502	-73.761	22.6	3.1	4.98E+14	0.30	7.82	3.80	3.84
160	05/07/01	00:40:27	-16.504	-73.650	25.4	3.1	8.36E+13	0.27	1.93	3.28	3.64
161	05/07/01	01:23:05	-17.201	-72.653	4.8	3.2	1.63E+15	0.44	8.20	4.14	3.97
162	05/07/01	01:39:22	-17.231	-72.728	0.4	2.9	1.39E+15	0.38	10.76	4.10	3.95
163	05/07/01	02:38:48	-16.369	-73.532	32.9	3.6	1.81E+14	0.27	3.83	3.50	3.73
164	05/07/01	02:54:32	-16.593	-72.928	55.1	3.5	1.85E+13	0.27	0.39	2.84	3.47
166	05/07/01	03:58:19	-16.586	-73.448	21.8	3.5	4.92E+13	0.23	1.76	3.13	3.58
167	05/07/01	04:26:59	-16.499	-73.567	21.2	3.3	2.05E+14	0.33	2.47	3.54	3.74
168	05/07/01	04:54:23	-16.955	-72.903	16.6	3.0	1.12E+14	0.41	0.70	3.37	3.67
169	05/07/01	05:26:42	-16.325	-73.739	17.6	3.3	1.80E+14	0.30	2.82	3.50	3.73
170	05/07/01	05:41:13	-17.144	-73.302	12.0	2.7	3.22E+14	0.34	3.62	3.67	3.79
171	05/07/01	07:44:31	-16.336	-73.890	57.6	4.0	2.29E+13	0.24	0.69	2.91	3.49
173	05/07/01	08:19:31	-16.429	-73.113	42.9	2.8	4.71E+14	0.32	6.28	3.78	3.83
175	05/07/01	12:03:01	-16.460	-73.449	27.8	2.8	5.40E+15	0.29	98.76	4.49	4.10
176	05/07/01	15:23:56	-16.135	-73.748	56.8	3.2	5.33E+14	0.30	8.37	3.82	3.85
177	05/07/01	15:31:21	-16.377	-73.777	24.6	3.1	1.22E+14	0.32	1.63	3.39	3.68
178	05/07/01	16:44:09	-16.489	-73.633	47.2	3.7	1.65E+15	0.28	32.94	4.14	3.97
179	05/07/01	17:18:14	-16.494	-73.228	40.5	2.7	1.31E+15	0.27	27.80	4.08	3.95
180	05/07/01	18:09:06	-17.026	-72.746	18.8	4.1	3.46E+15	0.44	17.41	4.36	4.05
181	05/07/01	19:31:38	-16.447	-73.476	29.0	3.0	1.49E+13	0.27	0.32	2.78	3.44
182	05/07/01	20:04:02	-16.863	-72.950	18.0	2.9	1.67E+14	0.30	2.63	3.48	3.72
183	05/07/01	22:02:40	-16.474	-73.558	19.6	3.6	1.95E+14	0.27	4.14	3.53	3.73
184	05/07/01	22:43:16	-16.431	-73.601	17.7	3.2	7.27E+13	0.26	1.77	3.24	3.62
185	05/07/01	22:59:05	-16.435	-73.419	33.2	3.1	1.27E+14	0.31	1.93	3.40	3.69
186	05/07/01	23:06:37	-16.510	-73.421	27.0	2.7	3.96E+13	0.26	0.96	3.06	3.55
187	05/07/01	23:45:56	-16.667	-74.070	1.2	2.9	9.83E+13	0.39	0.73	3.33	3.66
188	06/07/01	00:49:32	-17.291	-72.247	10.1	2.9	1.09E+15	0.32	14.55	4.03	3.93
190	06/07/01	01:07:16	-17.410	-71.305	15.7	2.7	9.49E+14	0.48	3.75	3.98	3.91
191	06/07/01	01:32:37	-16.501	-73.368	36.0	3.0	1.97E+13	0.24	0.62	2.86	3.47
192	06/07/01	01:40:15	-16.388	-73.436	35.0	2.4	6.06E+13	0.31	0.86	3.19	3.60
194	06/07/01	02:29:14	-16.355	-73.588	56.0	3.3	4.07E+13	0.26	0.99	3.07	3.56
195	06/07/01	02:54:04	-16.574	-73.591	27.2	3.2	1.63E+14	0.30	2.56	3.48	3.71

Tabla 2. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
196	06/07/01	03:11:49	-16.507	-73.666	31.2	3.1	9.74E+13	0.37	0.85	3.33	3.66
197	06/07/01	03:41:41	-16.978	-73.569	15.4	4.5	1.42E+14	0.42	0.82	3.44	3.70
198	06/07/01	03:58:10	-16.573	-73.698	21.0	2.9	1.03E+14	0.32	1.37	3.34	3.66
199	06/07/01	05:01:50	-15.474	-72.833	7.4	3.9	6.18E+13	0.29	1.06	3.19	3.61
200	06/07/01	06:29:47	-16.350	-73.891	10.8	3.0	3.40E+13	0.30	0.53	3.02	3.54
201	06/07/01	06:59:39	-15.682	-73.432	13.6	3.4	3.20E+13	0.41	0.20	3.00	3.53
202	06/07/01	08:08:34	-16.469	-73.566	27.8	3.1	1.00E+14	0.30	1.57	3.33	3.66
203	06/07/01	08:12:25	-16.573	-73.543	27.5	2.9	2.11E+14	0.26	5.14	3.55	3.74
204	06/07/01	08:19:38	-16.948	-72.871	10.7	2.7	3.15E+14	0.29	5.76	3.67	3.79
205	06/07/01	08:31:36	-16.596	-74.158	10.6	2.8	3.30E+14	0.36	3.09	3.68	3.79
206	06/07/01	08:41:09	-17.969	-71.521	30.6	3.0	5.81E+14	0.40	4.14	3.84	3.86
207	06/07/01	08:48:29	-16.800	-73.629	41.4	3.5	2.28E+13	0.27	0.50	2.90	3.49
209	06/07/01	09:54:37	-16.483	-73.476	29.0	3.3	7.77E+13	0.29	1.42	3.26	3.63
210	06/07/01	12:11:55	-16.965	-72.562	32.2	3.5	9.55E+13	0.32	1.27	3.32	3.65
211	06/07/01	13:11:16	-16.468	-73.515	29.0	3.1	6.05E+13	0.32	0.83	3.19	3.60
213	06/07/01	15:16:18	-16.858	-73.925	10.1	3.4	8.83E+13	0.34	0.99	3.30	3.65
214	06/07/01	15:26:59	-16.445	-73.583	18.7	3.4	5.27E+13	0.28	1.02	3.15	3.59
215	06/07/01	17:57:29	-17.651	-72.294	2.4	3.0	2.50E+14	0.41	1.57	3.60	3.76
216	06/07/01	19:45:17	-16.884	-72.888	19.1	3.3	2.83E+13	0.34	0.32	2.97	3.52
217	06/07/01	19:56:34	-17.261	-72.517	35.0	3.5	1.76E+14	0.28	3.42	3.50	3.72
218	06/07/01	19:59:51	-17.165	-73.417	14.0	3.0	2.43E+14	0.36	2.27	3.59	3.76
219	06/07/01	20:49:16	-16.430	-73.654	16.5	3.6	5.31E+13	0.29	0.97	3.15	3.59
220	06/07/01	22:29:25	-16.489	-73.557	21.4	3.3	1.78E+14	0.36	1.73	3.50	3.72
223	07/07/01	02:58:30	-16.306	-73.876	13.1	3.3	1.62E+14	0.29	2.96	3.47	3.71
225	07/07/01	03:13:07	-17.041	-72.224	16.2	4.4	1.98E+14	0.34	2.23	3.53	3.74
226	07/07/01	05:05:43	-16.381	-73.612	41.4	4.3	1.64E+13	0.24	0.52	2.81	3.45
227	07/07/01	05:19:43	-16.414	-73.878	22.7	3.9	9.76E+15	0.38	75.35	4.66	4.17
228	07/07/01	05:28:39	-17.083	-72.866	8.9	4.0	1.93E+14	0.34	2.17	3.52	3.73
229	07/07/01	06:51:56	-15.549	-72.688	10.0	3.9	1.87E+13	0.30	0.29	2.85	3.47
230	07/07/01	07:47:23	-16.427	-73.389	48.5	3.8	1.94E+14	0.25	5.41	3.53	3.73
231	07/07/01	07:50:04	-16.454	-73.624	32.7	2.7	1.82E+14	0.26	4.81	3.51	3.73

Tabla 3. Parámetros de la fuente sísmica de réplicas de la estación Bella Unión

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
2	28/06/01	05:13:26	-16.777	-73.990	9.6	3.4	7.55E+13	0.26	1.84	3.25	3.63
3	28/06/01	07:50:49	-16.353	-73.836	5.6	2.9	1.94E+13	0.24	0.61	2.86	3.47
4	28/06/01	08:25:07	-16.413	-73.684	21.3	3.0	1.80E+14	0.24	5.69	3.50	3.73
5	28/06/01	09:01:01	-16.009	-75.103	4.3	3.0	1.37E+13	0.29	0.25	2.76	3.43
7	28/06/01	12:20:46	-15.877	-74.479	29.2	2.5	1.47E+13	0.25	0.41	2.78	3.44
8	28/06/01	19:13:28	-17.535	-71.921	10.2	3.1	6.47E+14	0.29	11.85	3.87	3.87
9	28/06/01	23:18:19	-16.529	-73.872	28.1	4.6	2.36E+14	0.32	3.15	3.58	3.76
10	29/06/01	00:07:30	-16.344	-74.001	6.6	3.0	2.57E+14	0.25	7.16	3.61	3.77
11	29/06/01	00:21:43	-16.387	-73.916	8.9	3.3	4.16E+13	0.25	1.16	3.08	3.56
12	29/06/01	06:03:30	-16.399	-73.465	33.1	2.8	6.06E+13	0.26	1.48	3.19	3.60
14	29/06/01	06:23:36	-16.466	-73.651	18.4	2.9	3.54E+13	0.27	0.75	3.03	3.54
15	29/06/01	06:45:18	-17.101	-73.865	3.3	3.0	3.72E+14	0.29	6.80	3.71	3.81
19	29/06/01	08:42:59	-15.384	-74.664	59.1	2.9	1.09E+13	0.21	0.49	2.69	3.41
20	29/06/01	10:27:03	-16.480	-73.528	21.5	2.8	1.56E+14	0.29	2.85	3.46	3.71
22	29/06/01	11:54:09	-16.369	-73.772	5.8	3.1	7.38E+13	0.25	2.06	3.25	3.63
24	29/06/01	12:19:54	-16.406	-73.741	13.9	3.6	4.61E+13	0.25	1.28	3.11	3.57
25	29/06/01	14:36:23	-16.829	-72.928	18.6	2.8	5.13E+14	0.34	5.77	3.81	3.84
28	29/06/01	16:35:52	-16.078	-74.569	13.8	2.8	2.17E+15	0.26	52.84	4.22	4.00
29	29/06/01	16:42:41	-16.480	-73.460	26.1	3.2	1.38E+14	0.29	2.53	3.43	3.70
30	29/06/01	16:58:42	-16.085	-74.549	19.8	4.8	7.80E+14	0.29	14.27	3.93	3.89
31	29/06/01	18:01:59	-16.526	-73.498	30.1	2.7	2.09E+14	0.26	5.09	3.55	3.74
33	29/06/01	22:56:07	-16.445	-73.641	20.0	4.3	5.18E+14	0.26	12.62	3.81	3.84
34	29/06/01	22:56:50	-16.308	-73.859	11.3	3.0	4.25E+14	0.27	9.01	3.75	3.82
36	29/06/01	23:50:45	-17.058	-72.657	14.5	2.9	3.72E+14	0.30	5.83	3.71	3.81
38	30/06/01	02:54:42	-16.302	-74.055	18.9	2.5	1.38E+14	0.24	4.36	3.43	3.70
41	30/06/01	06:20:12	-16.380	-73.857	32.1	3.0	1.46E+13	0.24	0.46	2.78	3.44
47	30/06/01	11:32:25	-16.379	-73.847	23.4	3.0	7.23E+13	0.27	1.53	3.24	3.62
56	01/07/01	00:18:14	-16.295	-74.088	5.2	3.2	5.91E+14	0.27	12.51	3.85	3.86
58	01/07/01	02:32:14	-15.825	-74.605	35.4	3.0	1.52E+13	0.22	0.61	2.79	3.44
60	01/07/01	07:01:03	-16.474	-73.623	42.7	3.1	5.22E+13	0.30	0.82	3.15	3.59
61	01/07/01	07:40:45	-16.768	-73.789	12.1	3.9	1.83E+15	0.32	24.46	4.18	3.98
63	01/07/01	09:24:02	-16.320	-74.022	14.5	2.7	8.16E+13	0.24	2.58	3.27	3.64
69	01/07/01	11:46:59	-16.080	-73.587	26.7	3.1	1.28E+14	0.29	2.34	3.40	3.69
70	01/07/01	12:16:57	-16.475	-73.481	0.2	3.0	9.02E+14	0.32	12.03	3.97	3.91
71	01/07/01	12:41:00	-16.332	-74.022	15.4	3.3	3.17E+15	0.26	77.27	4.33	4.04
74	01/07/01	13:03:47	-16.474	-73.477	38.6	3.9	2.31E+14	0.27	4.90	3.58	3.75
75	01/07/01	13:38:48	-16.341	-74.016	17.3	4.0	1.93E+14	0.25	5.36	3.52	3.73
76	01/07/01	14:52:44	-16.468	-73.806	46.8	3.0	8.46E+13	0.30	1.33	3.28	3.64

Tabla 3. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
83	02/07/01	00:44:02	-16.949	-73.853	3.2	2.9	2.47E+14	0.29	4.51	3.59	3.76
84	02/07/01	01:15:41	-16.486	-73.380	44.7	3.0	1.96E+13	0.24	0.62	2.86	3.47
85	02/07/01	02:49:57	-16.399	-73.929	11.2	3.0	1.04E+13	0.24	0.33	2.68	3.40
91	02/07/01	05:09:27	-16.391	-73.862	9.0	3.2	1.43E+13	0.23	0.51	2.77	3.44
92	02/07/01	05:14:48	-15.922	-74.477	27.4	3.0	3.27E+13	0.22	1.31	3.01	3.53
93	02/07/01	05:29:58	-16.422	-73.531	4.0	2.5	1.08E+14	0.26	2.62	3.35	3.67
99	02/07/01	09:49:34	-16.366	-73.629	30.3	3.1	6.09E+13	0.24	1.92	3.19	3.60
100	02/07/01	11:59:19	-15.218	-74.048	0.5	2.9	2.04E+13	0.25	0.57	2.87	3.48
101	02/07/01	14:07:33	-16.509	-73.661	42.1	3.3	1.52E+14	0.27	3.22	3.45	3.71
103	02/07/01	18:23:32	-16.329	-73.614	14.3	3.0	1.78E+14	0.25	4.96	3.50	3.72
108	02/07/01	23:10:03	-15.967	-74.629	17.5	2.8	1.50E+14	0.25	4.19	3.45	3.71
110	03/07/01	01:08:55	-17.079	-72.680	29.0	3.0	6.71E+14	0.31	10.19	3.88	3.87
113	03/07/01	03:58:10	-16.525	-73.666	25.4	3.5	5.99E+13	0.27	1.27	3.19	3.60
115	03/07/01	04:38:39	-16.333	-73.707	15.2	3.6	3.20E+13	0.24	1.01	3.00	3.53
125	03/07/01	08:52:54	-16.338	-73.856	13.6	2.9	4.35E+13	0.25	1.21	3.09	3.56
129	03/07/01	18:57:23	-16.370	-73.988	7.7	2.8	6.60E+14	0.27	13.98	3.88	3.87
131	03/07/01	21:32:50	-16.877	-74.064	1.4	2.5	4.03E+14	0.48	1.60	3.74	3.82
132	03/07/01	23:53:34	-16.465	-73.710	17.8	3.1	6.06E+14	0.28	12.13	3.86	3.86
133	04/07/01	02:32:41	-16.955	-72.813	21.9	2.8	6.91E+14	0.32	9.22	3.89	3.88
134	04/07/01	02:59:21	-16.534	-73.423	32.3	2.8	6.03E+13	0.27	1.28	3.19	3.60
136	04/07/01	04:54:16	-16.994	-72.819	10.0	2.7	4.17E+14	0.34	4.69	3.75	3.82
149	04/07/01	11:44:41	-16.451	-73.749	15.5	3.5	1.77E+14	0.26	4.31	3.50	3.72
150	04/07/01	13:02:28	-15.815	-72.834	8.1	3.5	2.01E+14	0.21	10.11	3.54	3.74
161	05/07/01	01:23:05	-17.201	-72.653	4.8	3.2	6.16E+14	0.36	5.77	3.86	3.86
162	05/07/01	01:39:22	-17.231	-72.728	0.4	2.9	9.50E+14	0.38	7.33	3.99	3.91
163	05/07/01	02:38:48	-16.369	-73.532	32.9	3.6	8.14E+13	0.23	2.91	3.27	3.64
169	05/07/01	05:26:42	-16.325	-73.739	17.6	3.3	7.39E+13	0.24	2.34	3.25	3.63
173	05/07/01	08:19:31	-16.429	-73.113	42.9	2.8	2.43E+14	0.24	7.68	3.59	3.76
174	05/07/01	08:38:48	-16.345	-73.976	11.7	3.0	2.45E+15	0.26	63.05	4.26	4.02
175	05/07/01	12:03:01	-16.460	-73.449	27.8	2.8	1.84E+15	0.25	51.32	4.18	3.98
176	05/07/01	15:23:56	-16.135	-73.748	56.8	3.2	2.16E+14	0.24	6.84	3.56	3.75
177	05/07/01	15:31:21	-16.377	-73.777	24.6	3.1	2.63E+13	0.26	0.64	2.95	3.51
178	05/07/01	16:44:09	-16.489	-73.633	47.2	3.7	4.35E+14	0.27	9.23	3.76	3.82
180	05/07/01	18:09:06	-17.026	-72.746	18.8	4.1	5.33E+14	0.27	12.30	3.82	3.85
188	06/07/01	00:49:32	-17.291	-72.247	10.1	2.9	4.78E+14	0.32	6.38	3.79	3.84
192	06/07/01	01:40:15	-16.388	-73.436	35.0	2.4	2.07E+13	0.27	0.44	2.88	3.48
195	06/07/01	02:54:04	-16.574	-73.591	27.2	3.2	4.27E+13	0.23	1.53	3.09	3.56
198	06/07/01	03:58:10	-16.573	-73.698	21.0	2.9	2.77E+13	0.25	0.77	2.96	3.51
199	06/07/01	05:01:50	-15.474	-72.833	7.4	3.9	2.21E+13	0.25	0.62	2.90	3.49
200	06/07/01	06:29:47	-16.350	-73.891	10.8	3.0	1.36E+13	0.24	0.43	2.76	3.43

Tabla 3. Continuación

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
203	06/07/01	08:12:25	-16.573	-73.543	27.5	2.9	9.63E+13	0.26	2.35	3.32	3.66
205	06/07/01	08:31:36	-16.596	-74.158	10.6	2.8	7.20E+13	0.29	1.32	3.24	3.62
208	06/07/01	09:22:00	-16.441	-73.551	30.0	3.0	7.56E+15	0.36	70.88	4.59	4.14
223	07/07/01	02:58:30	-16.306	-73.876	13.1	3.3	6.17E+13	0.26	1.50	3.19	3.60
225	07/07/01	03:13:07	-17.041	-72.224	16.2	4.4	8.34E+13	0.29	1.53	3.28	3.64
226	07/07/01	05:05:43	-16.381	-73.612	41.4	4.3	1.45E+13	0.25	0.40	2.77	3.44
227	07/07/01	05:19:43	-16.414	-73.878	22.7	3.9	2.79E+15	0.27	59.12	4.30	4.03
229	07/07/01	06:51:56	-15.549	-72.688	10.0	3.9	6.48E+13	0.25	1.80	3.21	3.61
230	07/07/01	07:47:23	-16.427	-73.389	48.5	3.8	9.50E+13	0.27	2.01	3.32	3.65
238	07/07/01	15:31:27	-16.049	-74.415	39.0	4.2	1.17E+13	0.26	0.28	2.71	3.41
240	07/07/01	16:22:30	-16.230	-73.610	44.4	3.6	7.82E+13	0.23	2.79	3.26	3.63
243	07/07/01	19:29:55	-17.877	-72.225	2.9	4.0	1.97E+15	0.48	7.79	4.20	3.99
245	07/07/01	21:27:34	-17.589	-71.790	19.5	3.7	2.05E+15	0.58	4.70	4.21	4.00
246	07/07/01	22:15:10	-16.942	-71.347	30.1	3.9	2.09E+14	0.32	2.78	3.55	3.74
248	08/07/01	01:25:26	-16.524	-73.490	24.5	2.8	1.03E+14	0.32	1.38	3.34	3.66
252	08/07/01	04:09:34	-17.694	-72.389	28.5	3.6	2.57E+14	0.34	2.89	3.61	3.77
256	08/07/01	07:07:30	-16.480	-73.523	41.8	3.1	4.29E+13	0.27	0.91	3.09	3.56
259	08/07/01	08:23:06	-14.539	-71.468	19.1	2.9	2.52E+14	0.38	1.94	3.60	3.76
261	08/07/01	09:19:31	-17.503	-71.838	38.0	3.2	5.02E+14	0.32	6.70	3.80	3.84
265	08/07/01	11:28:25	-16.765	-73.839	4.8	3.7	3.78E+14	0.30	5.93	3.72	3.81
267	08/07/01	11:52:24	-15.113	-75.126	50.6	3.3	3.73E+13	0.25	1.04	3.05	3.55
268	08/07/01	20:03:24	-17.414	-72.064	29.2	3.4	1.87E+15	0.44	9.40	4.18	3.99
269	08/07/01	21:15:21	-16.840	-72.690	10.6	2.7	2.07E+15	0.36	19.41	4.21	4.00
270	08/07/01	23:32:23	-16.492	-73.474	44.7	2.8	1.28E+14	0.26	3.12	3.41	3.69
273	09/07/01	05:37:56	-16.132	-74.379	18.3	5.5	1.30E+13	0.26	0.32	2.74	3.43
274	09/07/01	06:07:09	-16.321	-73.728	12.9	3.6	3.66E+13	0.25	1.02	3.04	3.55
275	09/07/01	09:53:04	-16.289	-74.065	10.6	3.2	2.22E+13	0.27	0.47	2.90	3.49
277	09/07/01	14:59:06	-16.889	-72.199	3.1	2.9	8.16E+14	0.36	7.64	3.94	3.89
278	09/07/01	17:56:39	-16.453	-73.498	28.3	3.5	8.01E+13	0.29	1.47	3.27	3.63
279	09/07/01	19:05:17	-17.625	-71.993	23.4	3.8	9.88E+14	0.43	5.44	4.00	3.92
284	10/07/01	05:14:00	-17.766	-72.249	5.3	2.9	2.63E+14	0.36	2.47	3.61	3.77
285	10/07/01	08:47:30	-16.475	-73.760	35.1	2.9	3.21E+13	0.26	0.78	3.00	3.53
287	10/07/01	17:35:40	-16.481	-73.516	40.0	3.5	2.37E+14	0.27	5.03	3.58	3.76
288	10/07/01	21:33:16	-16.037	-72.819	11.0	3.8	4.97E+15	0.29	90.94	4.46	4.09
289	11/07/01	01:28:02	-16.419	-72.768	20.3	3.2	1.52E+14	0.26	3.71	3.46	3.71
290	11/07/01	06:10:00	-17.951	-71.813	2.8	3.1	1.90E+14	0.32	2.54	3.52	3.73
291	11/07/01	07:08:06	-16.598	-72.753	27.6	3.2	5.12E+13	0.26	1.21	3.14	3.58
292	11/07/01	09:08:53	-16.628	-74.024	7.0	3.0	4.61E+13	0.29	0.84	3.11	3.57

Tabla 4. Parámetros de la fuente sísmica de réplicas de la estación Quilca

N°	Fecha dd/mm/aa	Hora (UTC)	Lat.	Lon.	Prof. (km)	ML	Mo (N.m)	Radio (km)	Δσ (Mpa)	Mw	Me
12	29/06/01	06:03:30	-16.399	-73.465	33.1	2.8	8.16E+13	0.36	0.77	3.27	3.64
13	29/06/01	06:16:56	-16.439	-73.389	36.2	3.1	1.99E+13	0.30	0.31	2.87	3.48
14	29/06/01	06:23:36	-16.466	-73.651	18.4	2.9	2.56E+13	0.26	0.62	2.94	3.50
15	29/06/01	06:45:18	-17.101	-73.865	3.3	3.0	4.64E+13	0.40	0.32	3.11	3.57
16	29/06/01	07:10:34	-16.545	-73.653	34.8	3.7	6.48E+13	0.37	0.54	3.21	3.61
18	29/06/01	08:16:39	-16.795	-72.859	19.7	2.8	1.58E+13	0.35	0.17	2.80	3.45
19	29/06/01	08:42:59	-15.384	-74.664	59.1	2.9	4.62E+13	0.27	1.04	3.11	3.57
20	29/06/01	10:27:03	-16.480	-73.528	21.5	2.8	9.95E+13	0.29	1.82	3.33	3.66
21	29/06/01	11:21:57	-16.824	-72.758	41.8	3.1	2.97E+13	0.30	0.47	2.98	3.52
22	29/06/01	11:54:09	-16.369	-73.772	5.8	3.1	7.06E+13	0.40	0.48	3.23	3.62
23	29/06/01	11:57:58	-18.184	-71.710	13.7	2.8	7.12E+15	0.45	34.15	4.57	4.13
24	29/06/01	12:19:54	-16.406	-73.741	13.9	3.6	2.36E+13	0.29	0.41	2.92	3.50
25	29/06/01	14:36:23	-16.829	-72.928	18.6	2.8	8.62E+14	0.37	7.49	3.96	3.90
26	29/06/01	14:41:14	-17.125	-73.582	20.1	3.2	2.87E+13	0.41	0.18	2.97	3.52
27	29/06/01	14:57:46	-16.502	-73.501	21.9	3.9	1.94E+13	0.28	0.39	2.86	3.47
28	29/06/01	16:35:52	-16.078	-74.569	13.8	2.8	5.19E+14	0.72	0.61	3.81	3.84
29	29/06/01	16:42:41	-16.480	-73.460	26.1	3.2	1.10E+14	0.36	1.03	3.36	3.67
30	29/06/01	16:58:42	-16.085	-74.549	19.8	4.8	5.48E+14	0.67	0.80	3.83	3.85
31	29/06/01	18:01:59	-16.526	-73.498	30.1	2.7	1.14E+14	0.27	2.62	3.37	3.67
32	29/06/01	22:33:19	-18.448	-71.519	9.4	3.0	1.63E+17	4.98	0.58	5.47	4.47
33	29/06/01	22:56:07	-16.445	-73.641	20.0	4.3	2.37E+14	0.41	1.49	3.58	3.76
34	29/06/01	22:56:50	-16.308	-73.859	11.3	3.0	3.68E+14	0.32	4.91	3.71	3.81
35	29/06/01	23:41:55	-16.470	-73.182	55.8	2.7	2.73E+13	0.40	0.19	2.96	3.51
36	29/06/01	23:50:45	-17.058	-72.657	14.5	2.9	4.38E+14	0.38	3.38	3.76	3.83
37	30/06/01	02:02:02	-16.437	-73.388	39.3	3.1	4.62E+13	0.36	0.43	3.11	3.57
38	30/06/01	02:54:42	-16.302	-74.055	18.9	2.5	9.79E+13	0.37	0.85	3.33	3.66
39	30/06/01	04:26:00	-17.188	-73.499	19.0	2.8	5.15E+13	0.46	0.24	3.14	3.58
40	30/06/01	05:05:57	-16.681	-73.304	26.9	2.8	1.25E+13	0.26	0.31	2.73	3.42
41	30/06/01	06:20:12	-16.380	-73.857	32.1	3.0	1.74E+13	0.32	0.23	2.83	3.46
42	30/06/01	07:43:14	-16.486	-73.526	24.2	3.1	1.83E+13	0.26	0.44	2.84	3.47
43	30/06/01	07:51:12	-16.693	-74.010	3.3	2.8	1.49E+14	0.32	1.99	3.45	3.70
44	30/06/01	08:34:48	-16.454	-73.555	13.9	2.8	1.61E+13	0.24	0.53	2.80	3.45
45	30/06/01	08:50:45	-16.933	-73.513	11.6	2.8	2.58E+13	0.33	0.32	2.94	3.51
46	30/06/01	11:11:00	-16.448	-73.682	24.8	3.2	1.89E+13	0.28	0.38	2.85	3.47
47	30/06/01	11:32:25	-16.379	-73.847	23.4	3.0	3.64E+13	0.44	0.18	3.04	3.54

ANEXO 2

Espectros de desplazamiento de las réplicas del Terremoto de Arequipa del 2001

a. Estación Tocota (*)

b. Estación Ocoña

c. Estación Caravelí

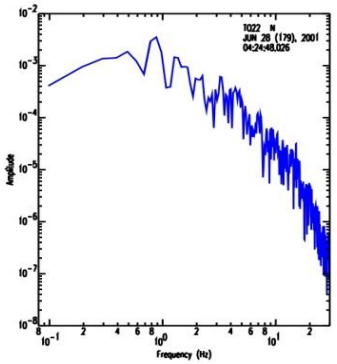
d. Estación Bella Unión

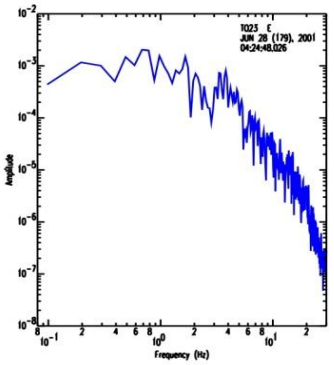
e. Estación Quilca

(*)Se debe tener en cuenta que en la parte superior derecha de cada uno de los espectros aparece el nombre de la estación sísmica, la fecha y la hora de la réplica, sin embargo puede no coincidir con la hora UTC (Universal Time Coordinated) de la réplica, por ello se debe considerar el número de réplica de la Tabla 7.3.

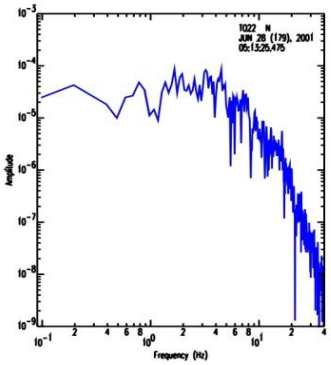
a. Estación Tocota

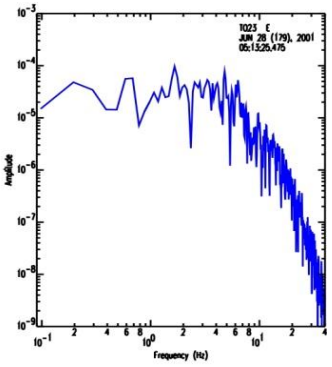
Réplica 1



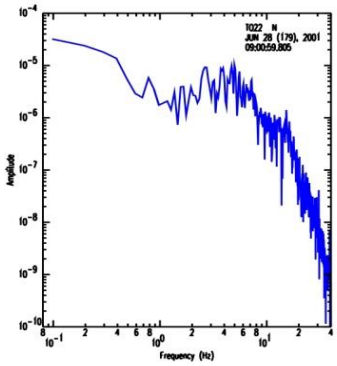


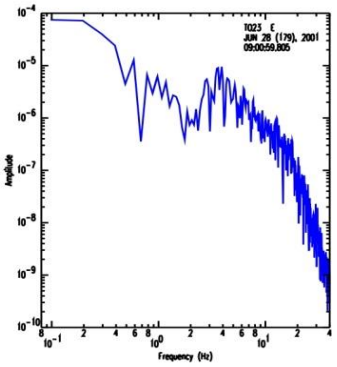
Réplica 2



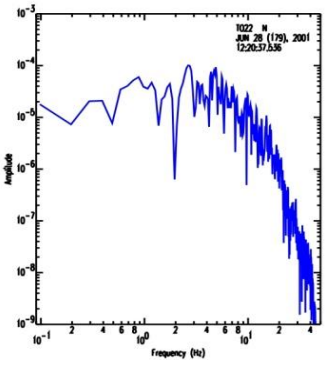


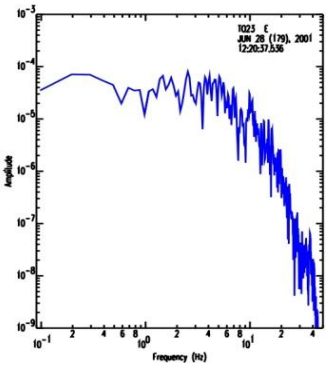
Réplica 3





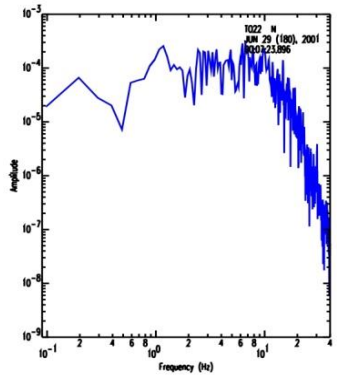
Réplica 7

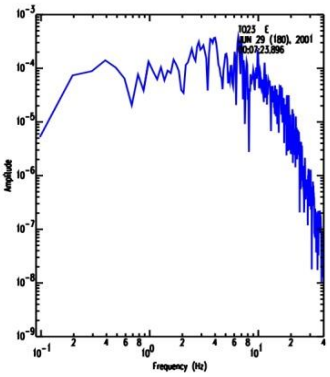




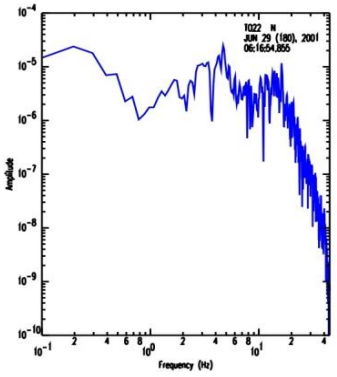
a. Continuación

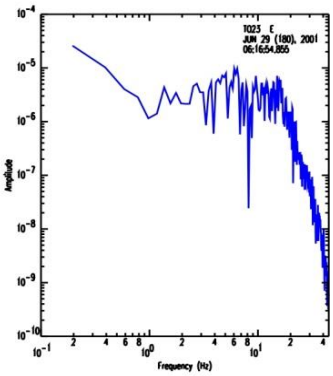
Réplica 10



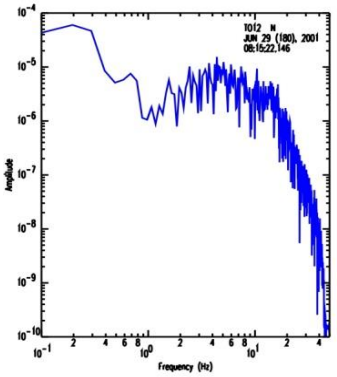


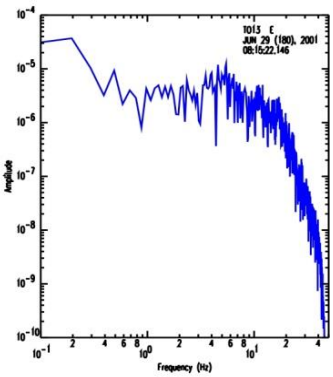
Réplica 13



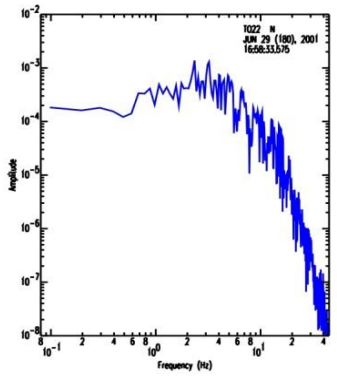


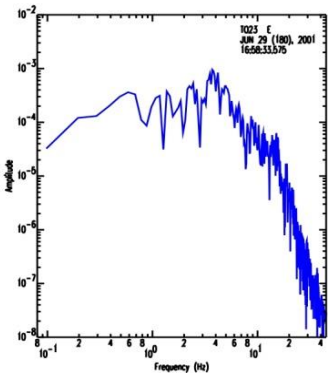
Réplica 18





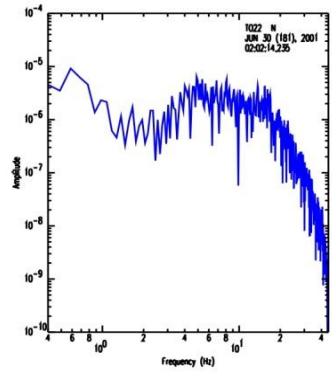
Réplica 30

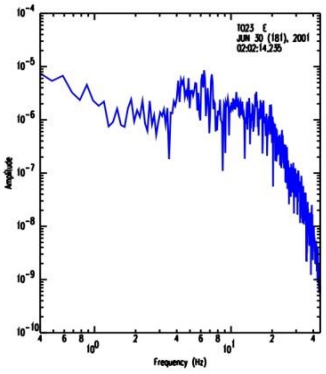




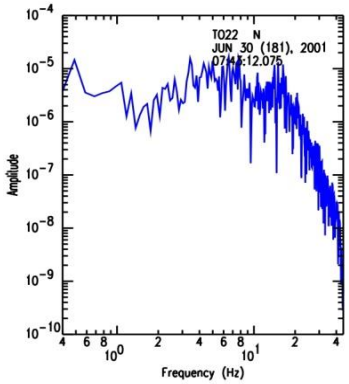
a. Continuación

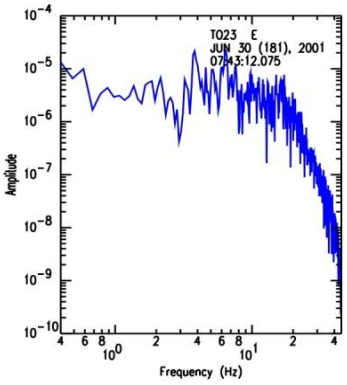
Réplica 37



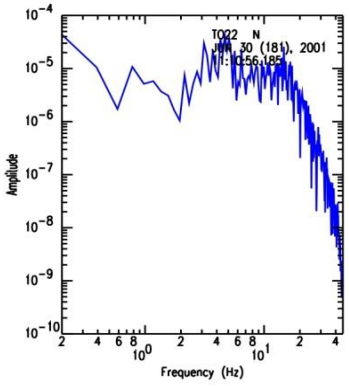


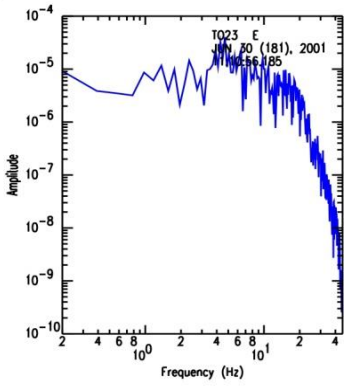
Réplica 42



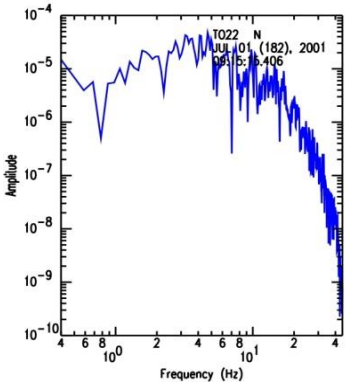


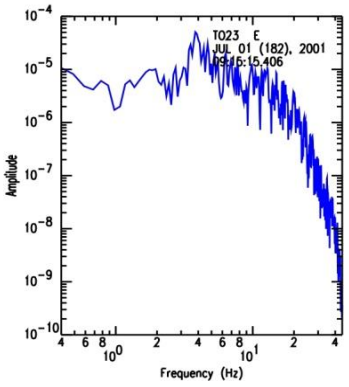
Réplica 46





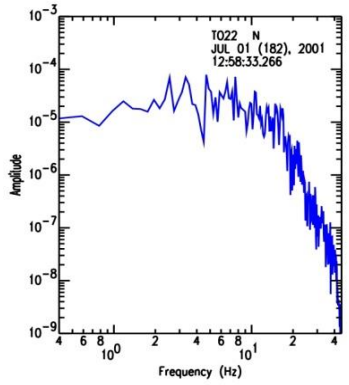
Réplica 62

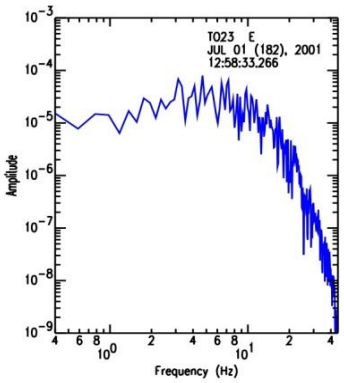




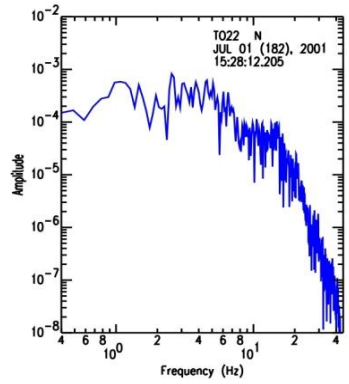
a. Continuación

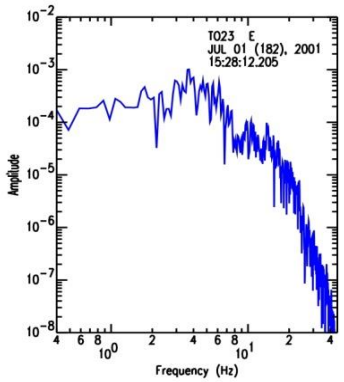
Réplica 72



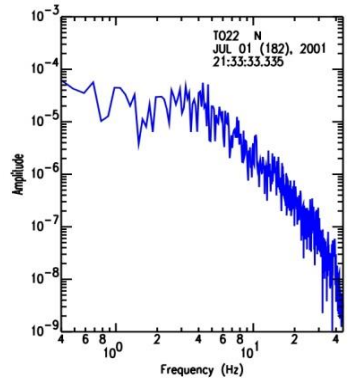


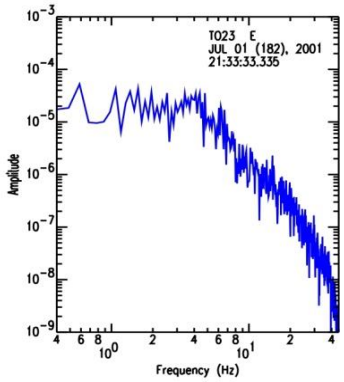
Réplica 77



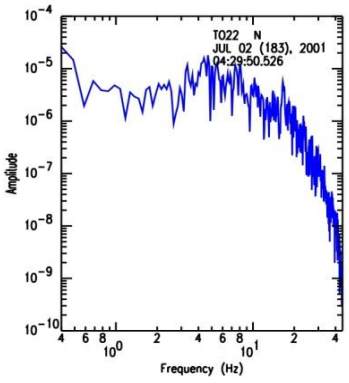


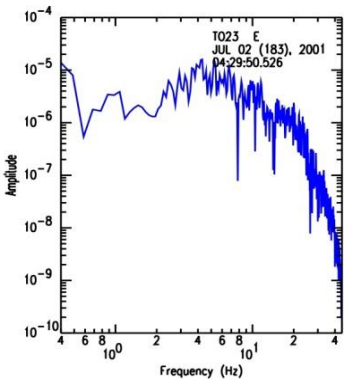
Réplica 81





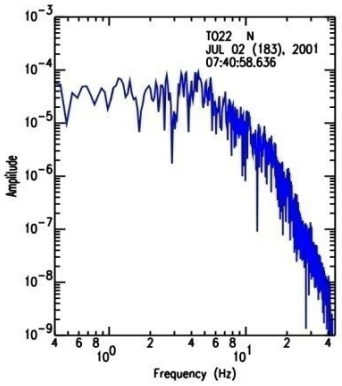
Réplica 90

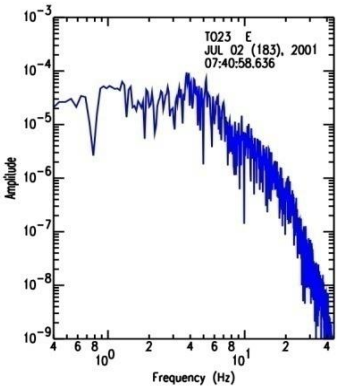




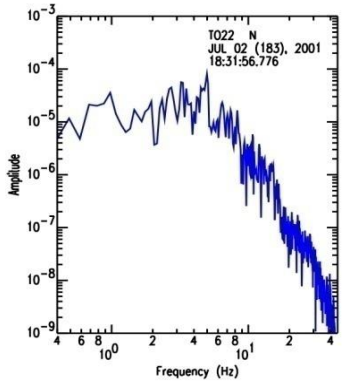
a. Continuación

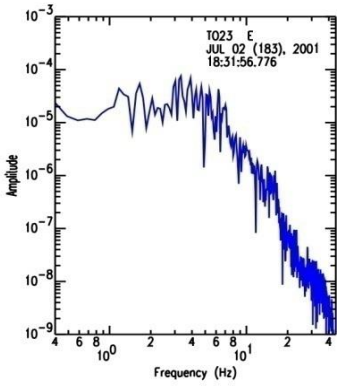
Réplica 96



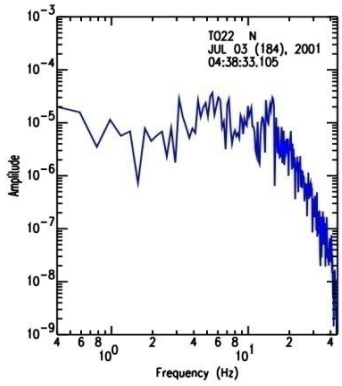


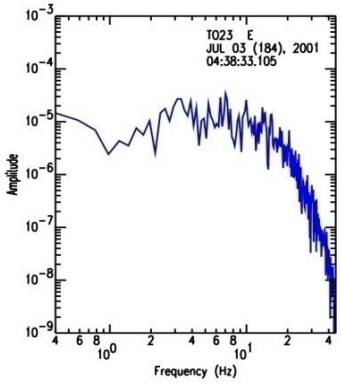
Réplica 104



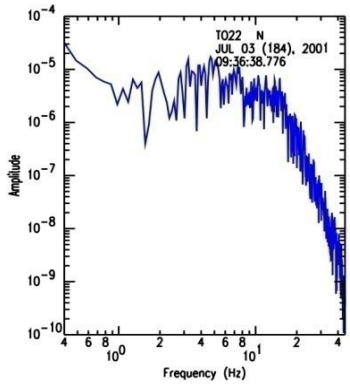


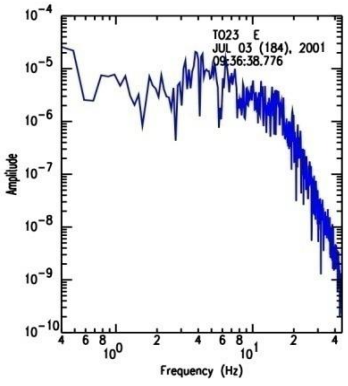
Réplica 115





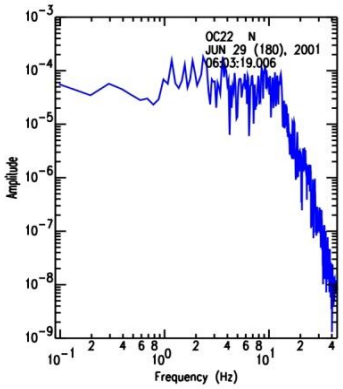
Réplica 126

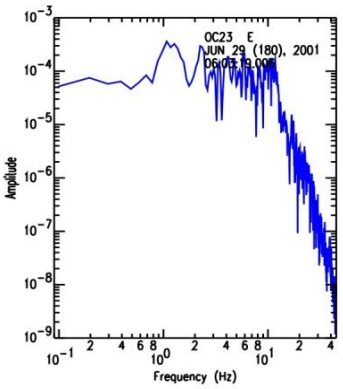




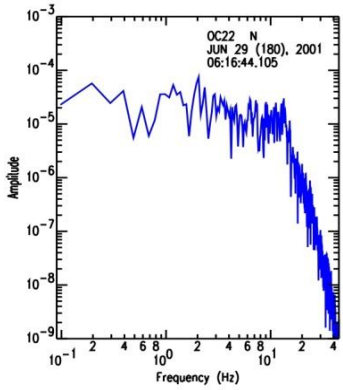
b. Estación Ocoña

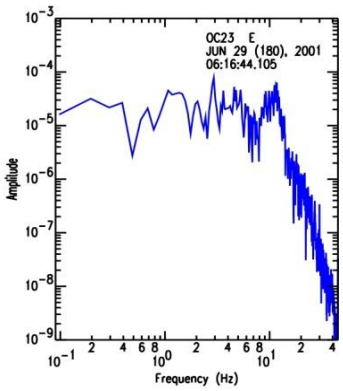
Réplica 12



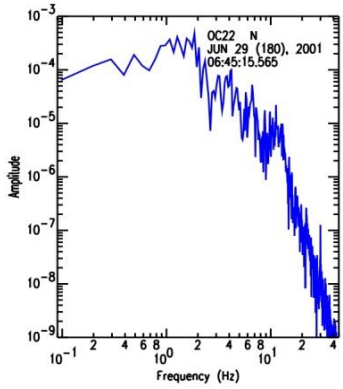


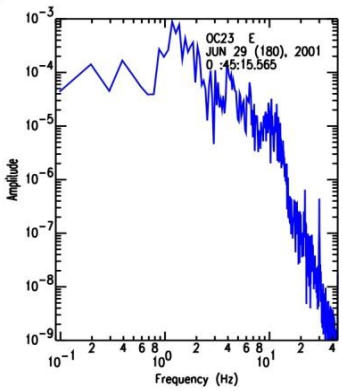
Réplica 13



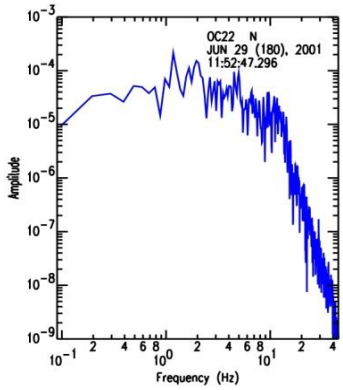


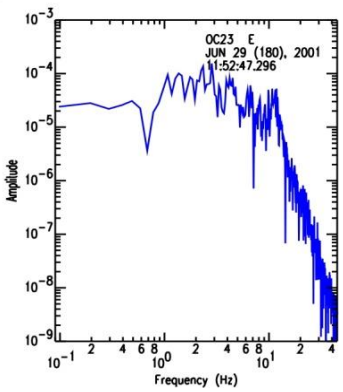
Réplica 15





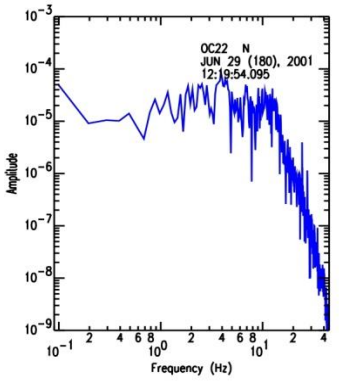
Réplica 22

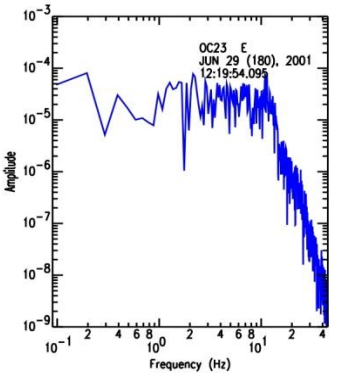




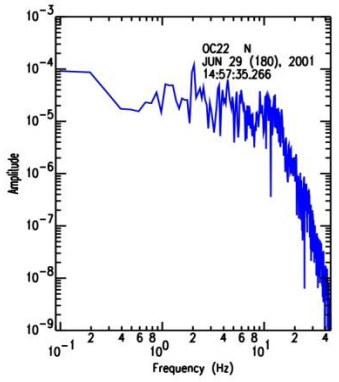
b. Continuación

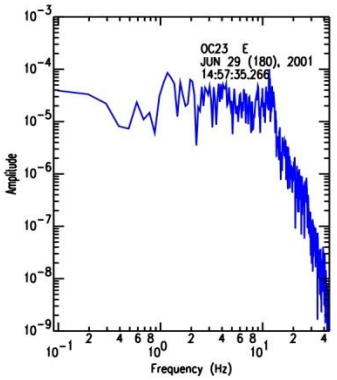
Réplica 24



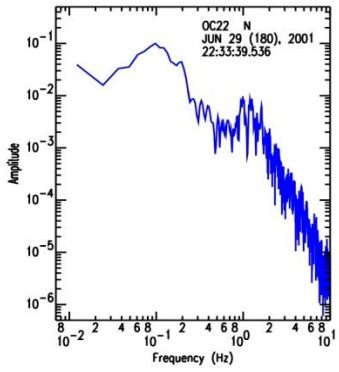


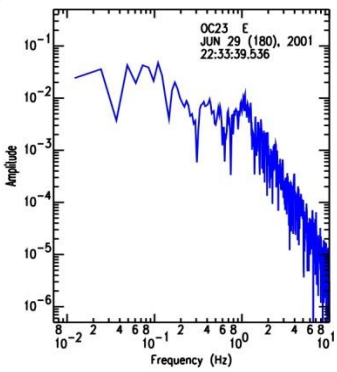
Réplica 27



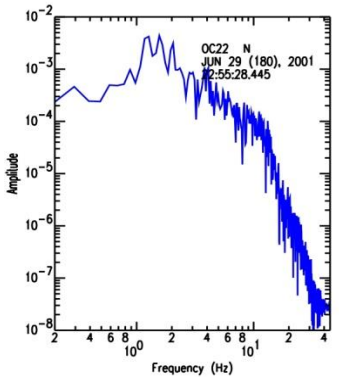


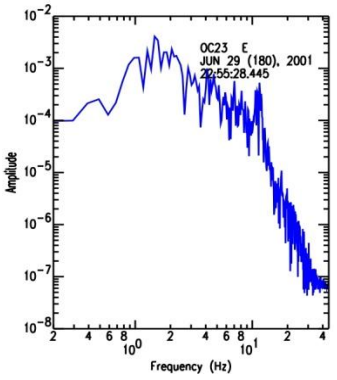
Réplica 32





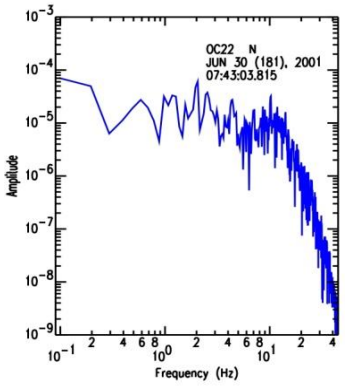
Réplica 34

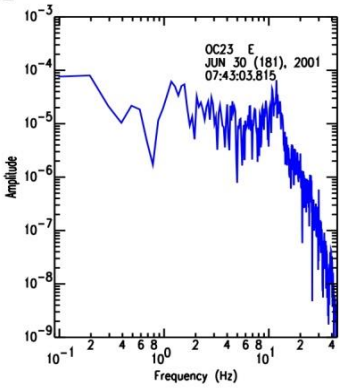




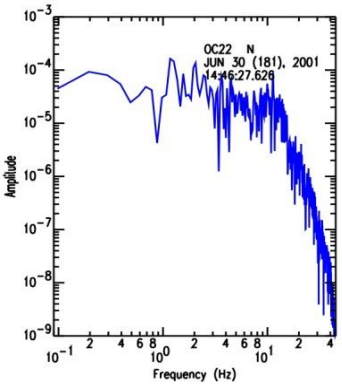
b. Continuación

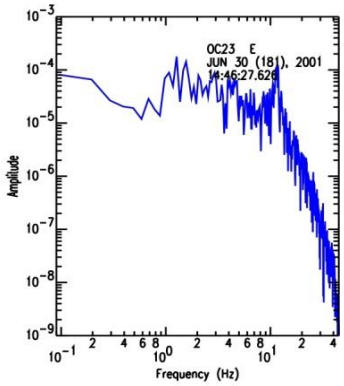
Réplica 42



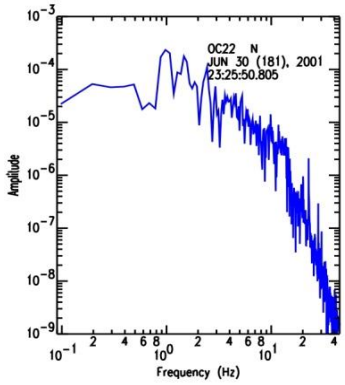


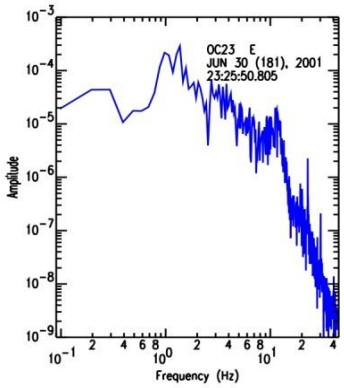
Réplica 50



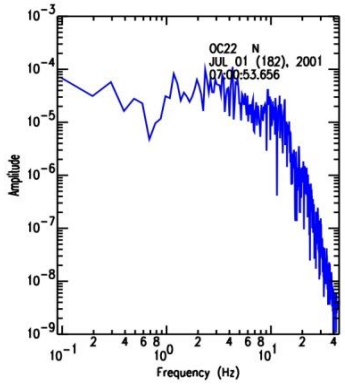


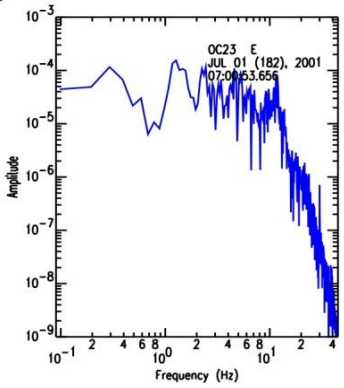
Réplica 55





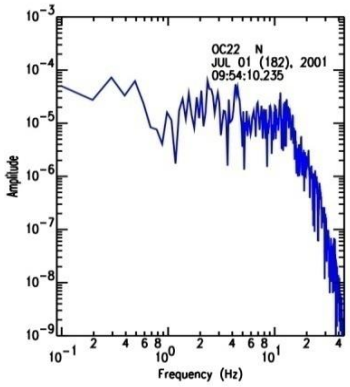
Réplica 60

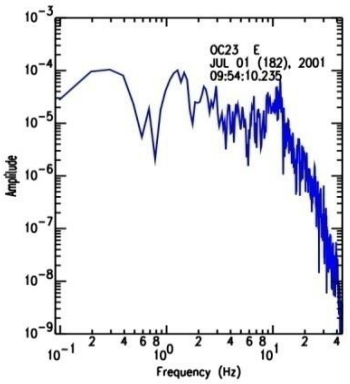




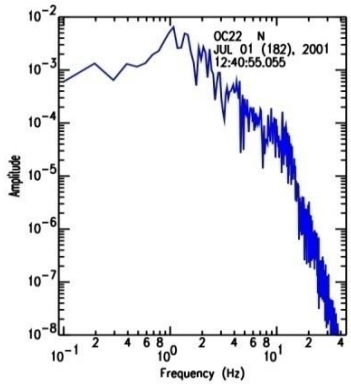
b. Continuación

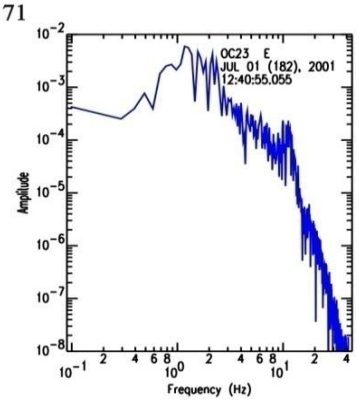
Réplica 64



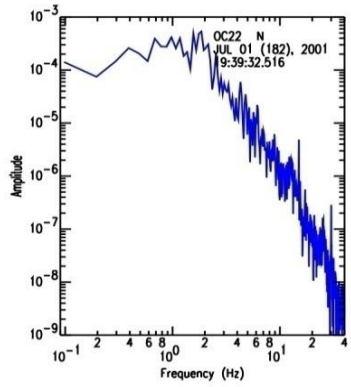


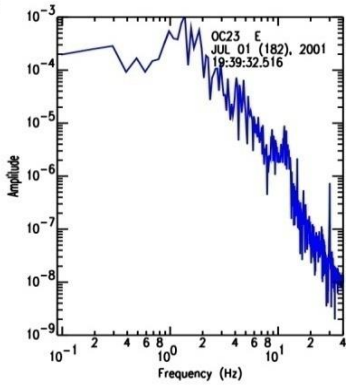
Réplica 71



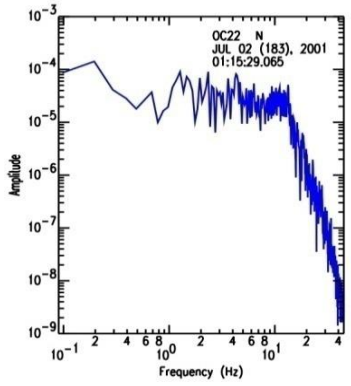


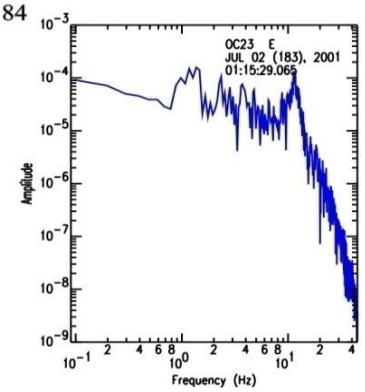
Réplica 79





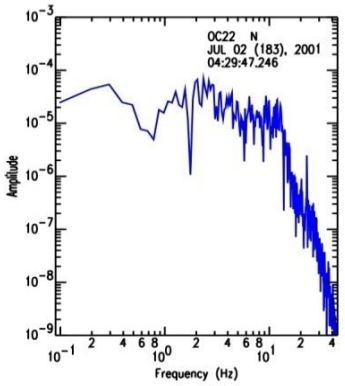
Réplica 84

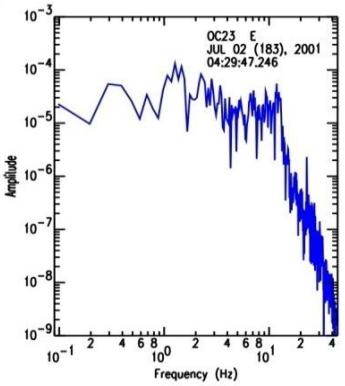




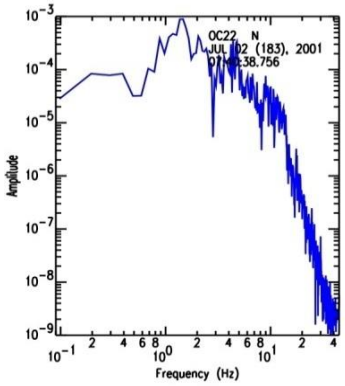
b. Continuación

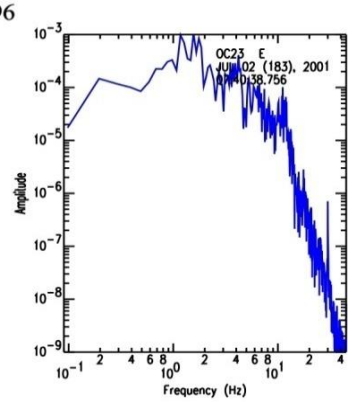
Réplica 90



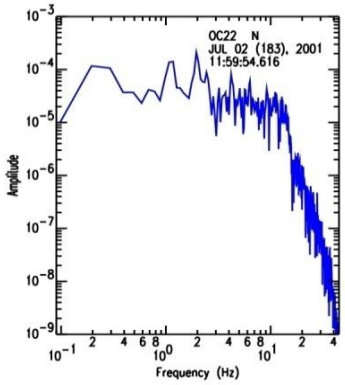


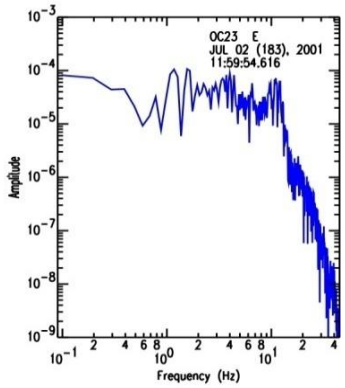
Réplica 96

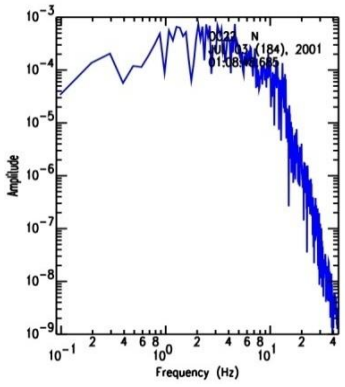


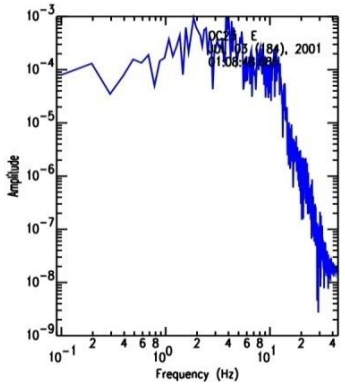


Réplica 100



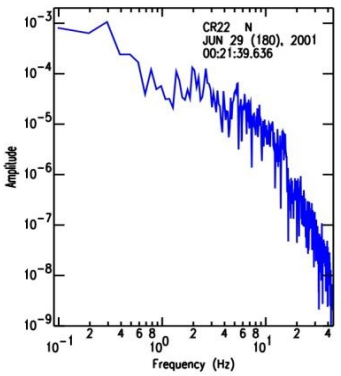


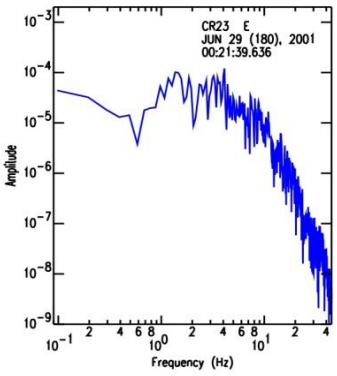




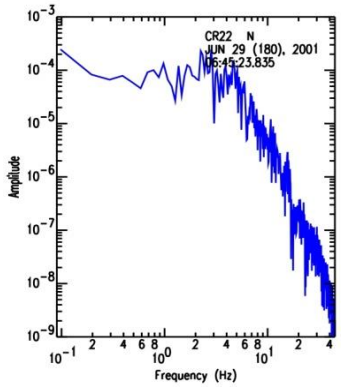
c. Estación Caravelí

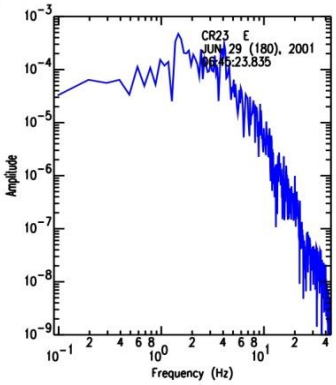
Réplica 11



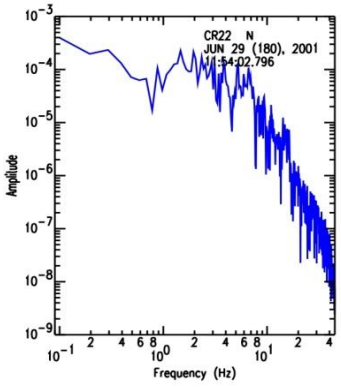


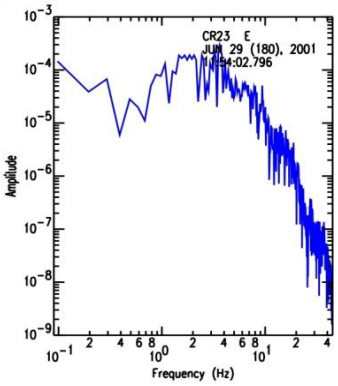
Réplica 15



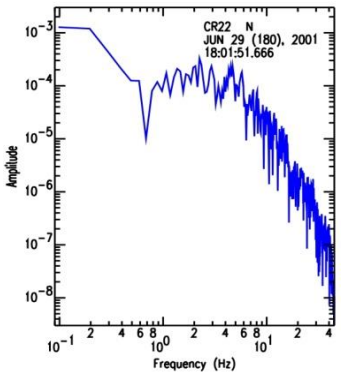


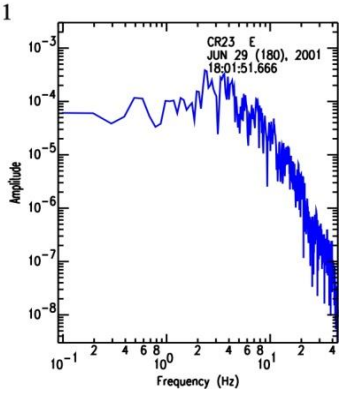
Réplica 22





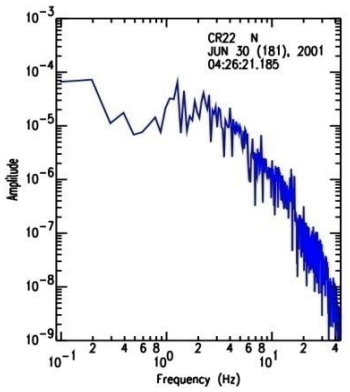
Réplica 31

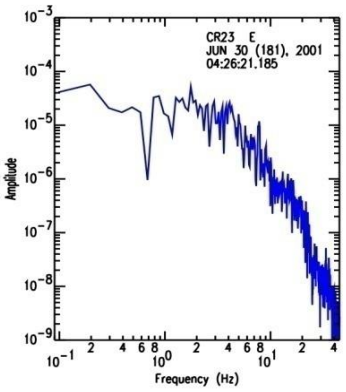




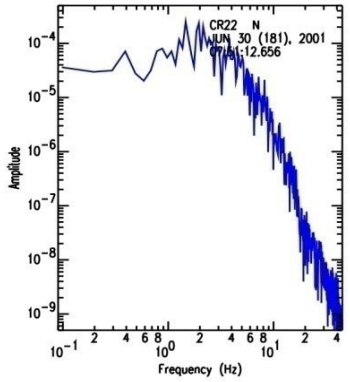
c. Continuación

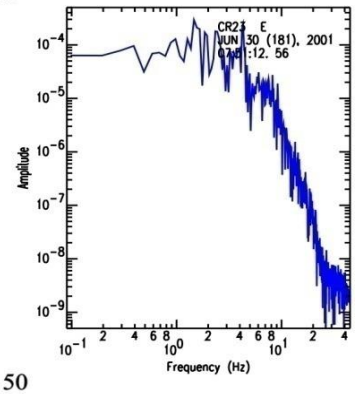
Réplica 39



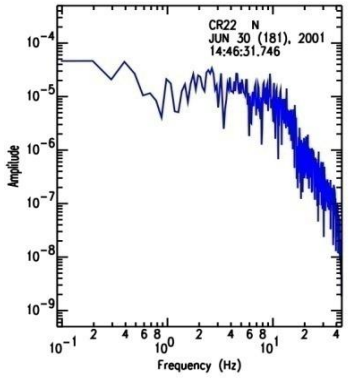


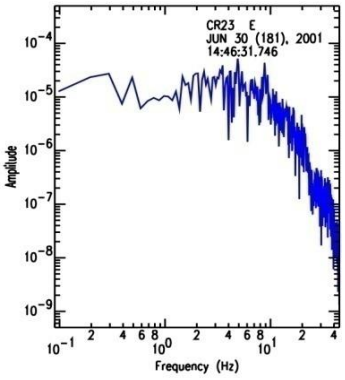
Réplica 43



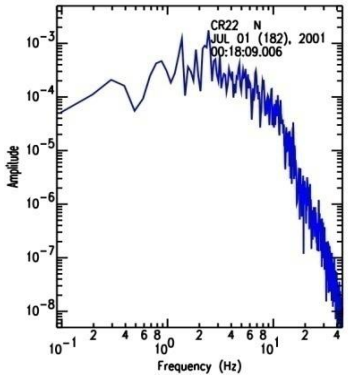


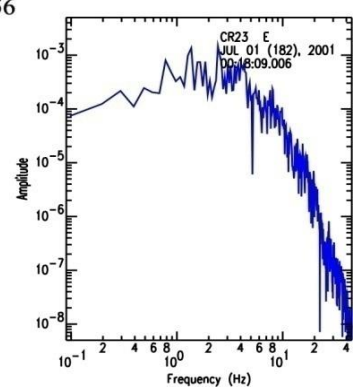
Réplica 50





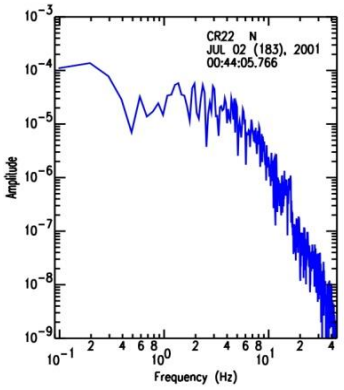
Réplica 56

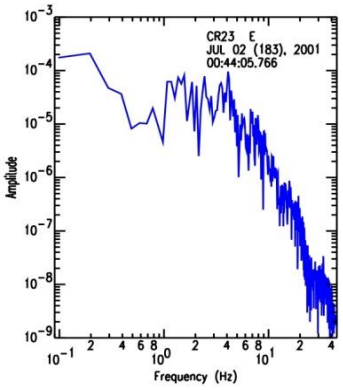




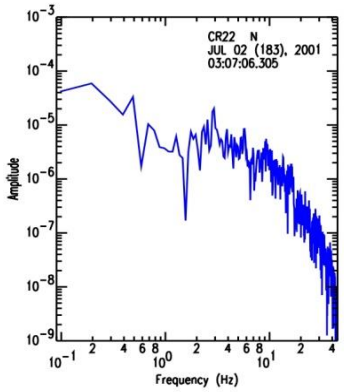
c. Continuación

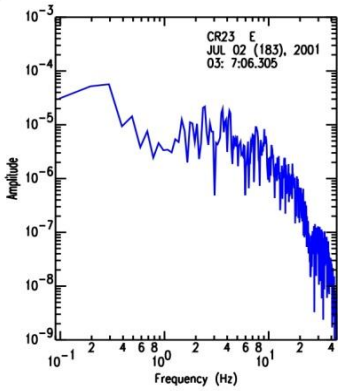
Réplica 83



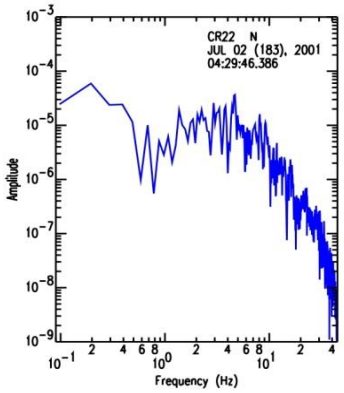


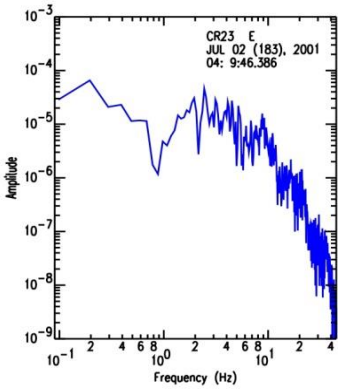
Réplica 87



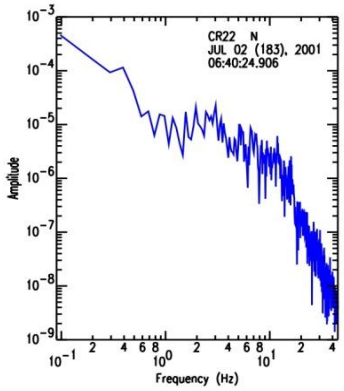


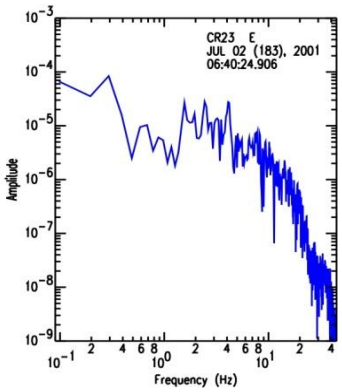
Réplica 90





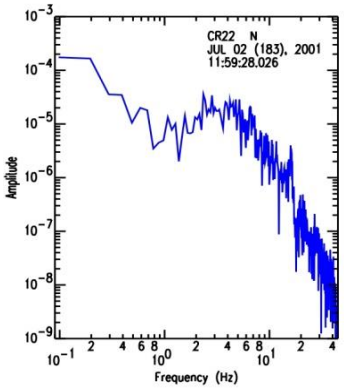
Réplica 95

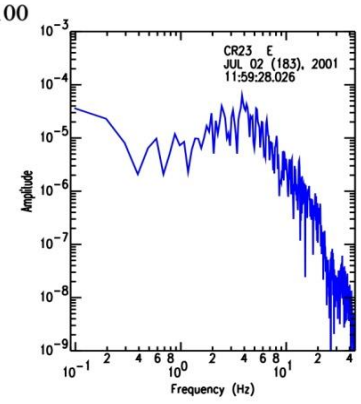




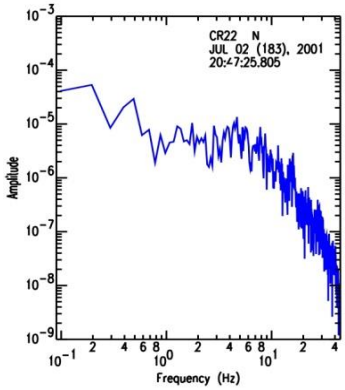
c. Continuación

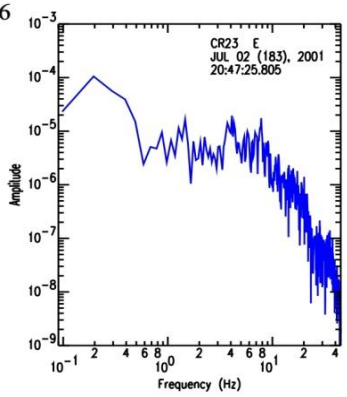
Réplica 100



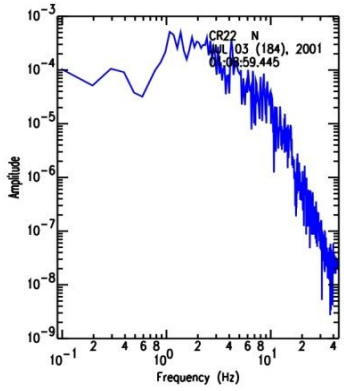


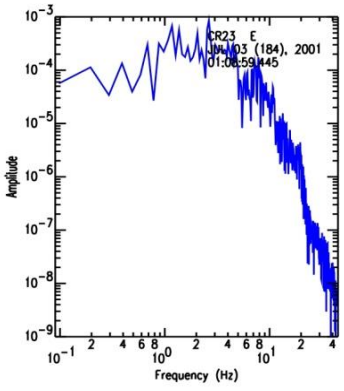
Réplica 106



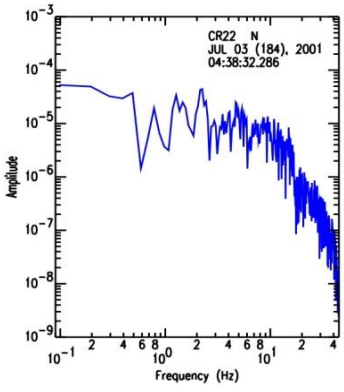


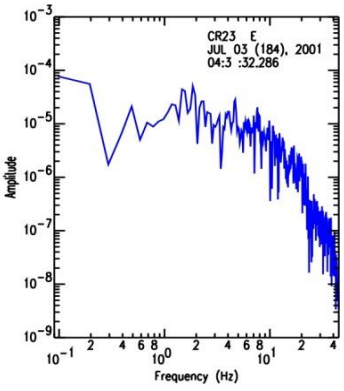
Réplica 110





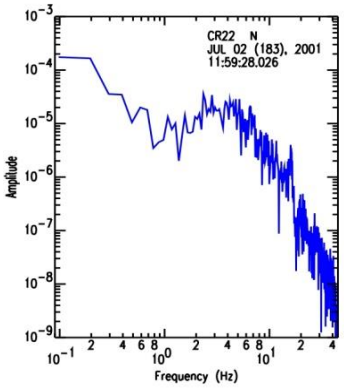
Réplica 115

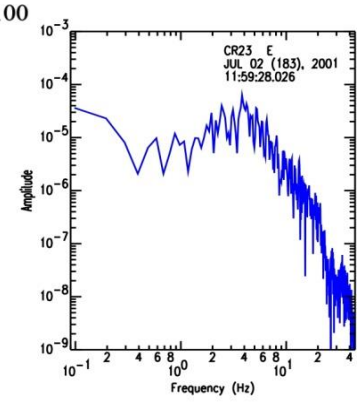




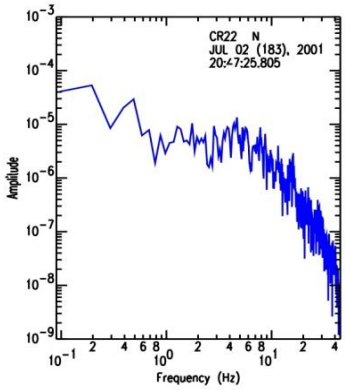
c. Continuación

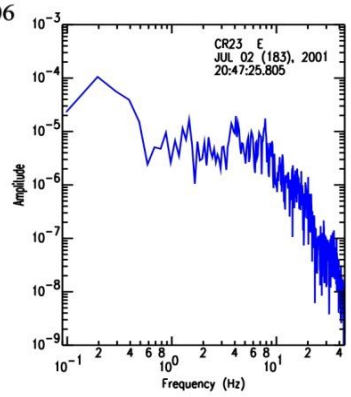
Réplica 100



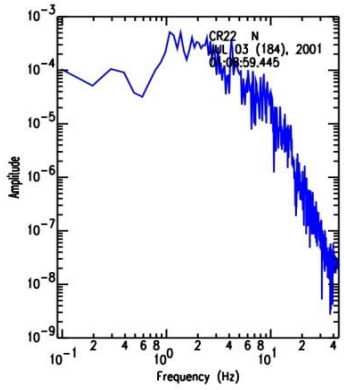


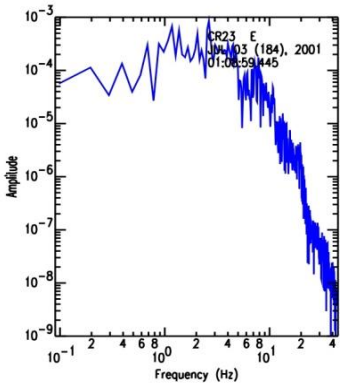
Réplica 106



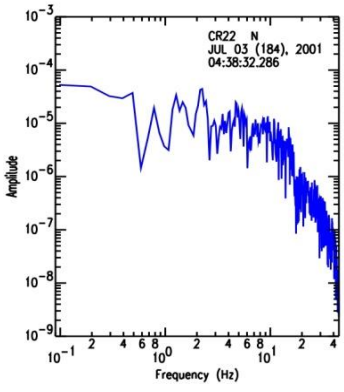


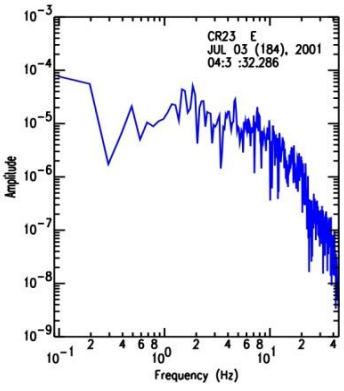
Réplica 110





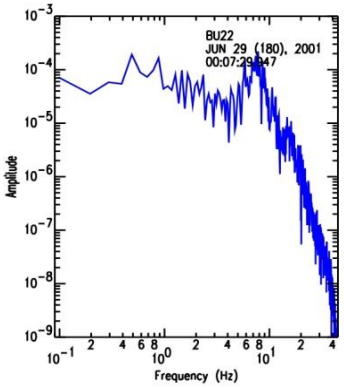
Réplica 115

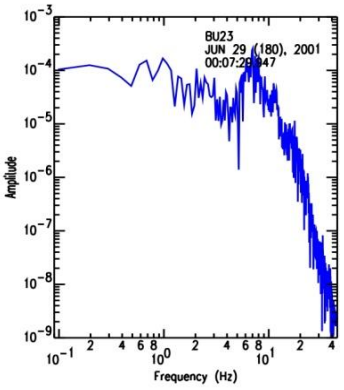




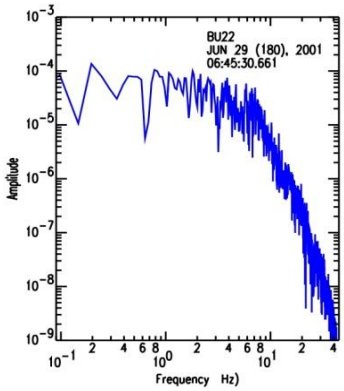
d. Estación Bella Unión

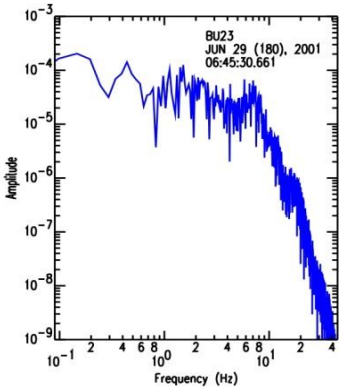
Réplica 10



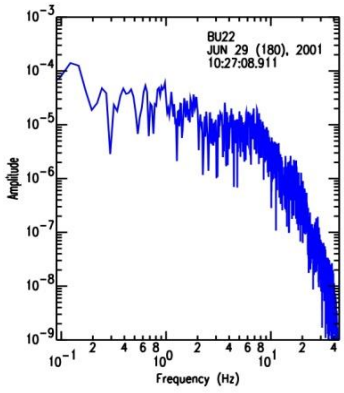


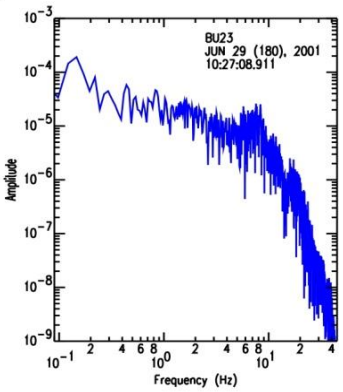
Réplica 15



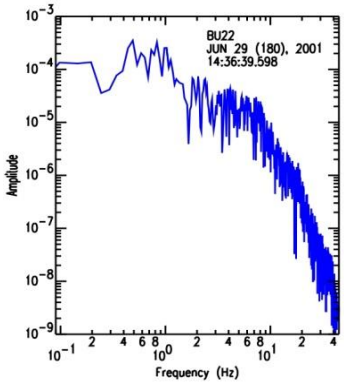


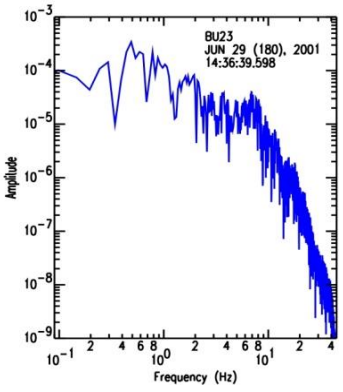
Réplica 20





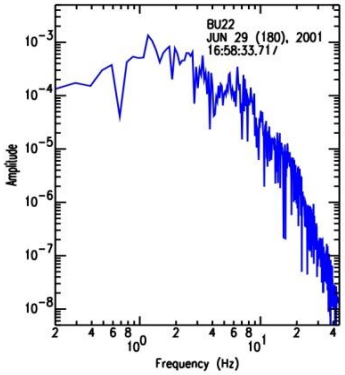
Réplica 25

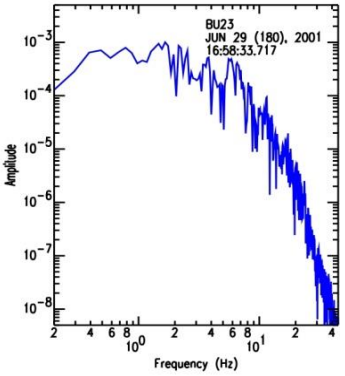




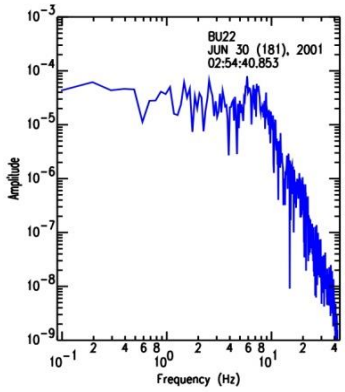
d. Continuación

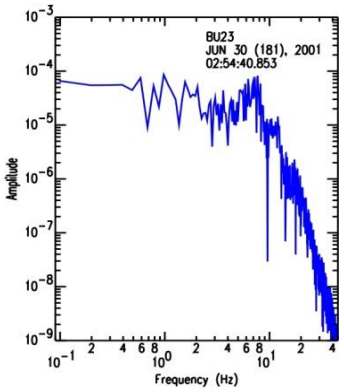
Réplica 30



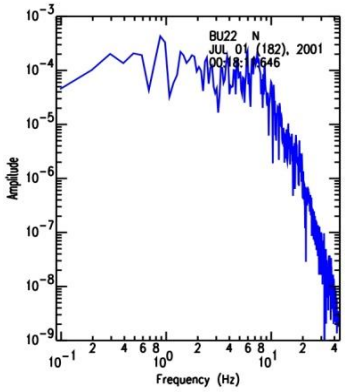


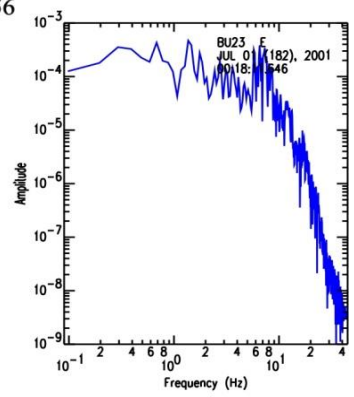
Réplica 38



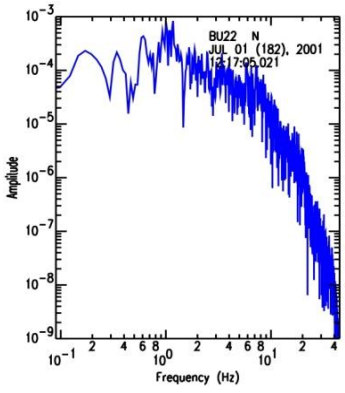


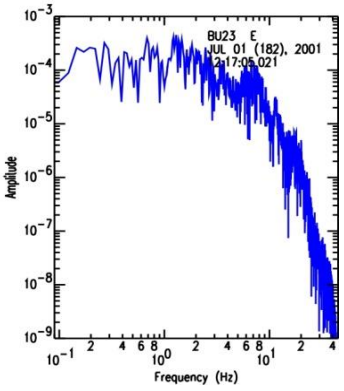
Réplica 56





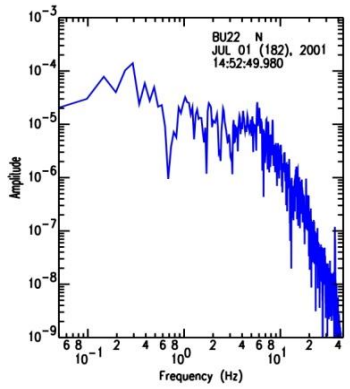
Réplica 70

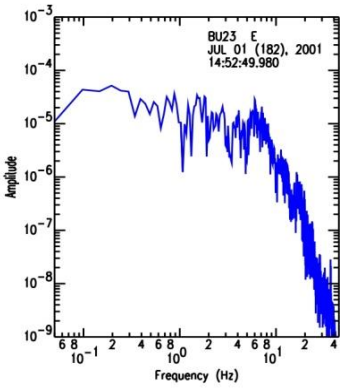




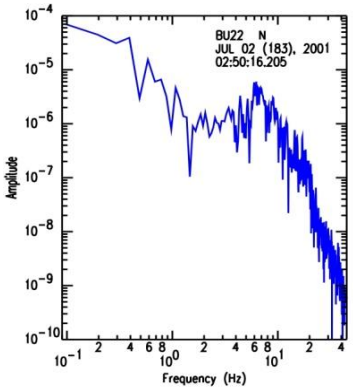
d. Continuación

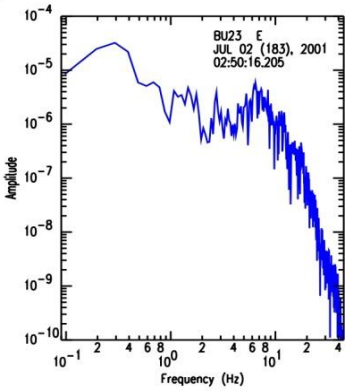
Réplica 76



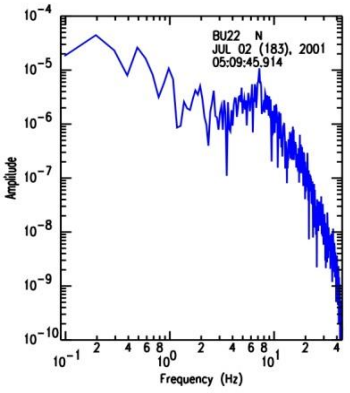


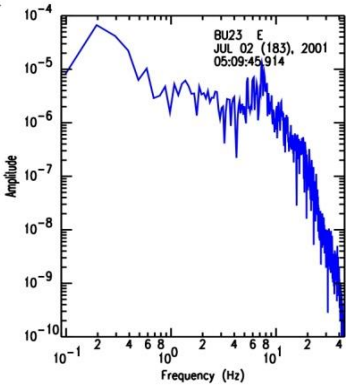
Réplica 85



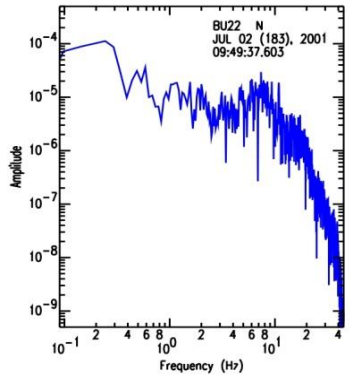


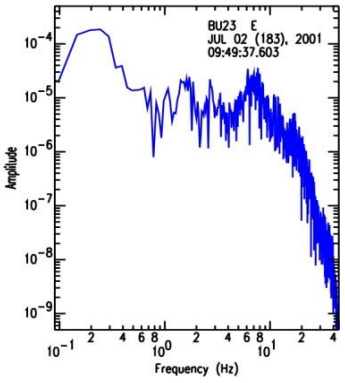
Réplica 91





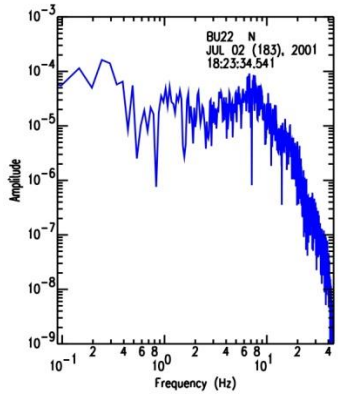
Réplica 99

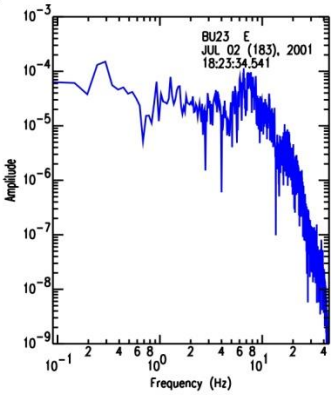




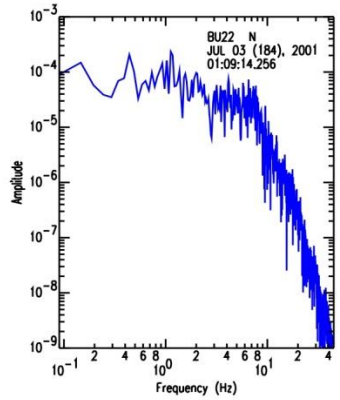
d. Continuación

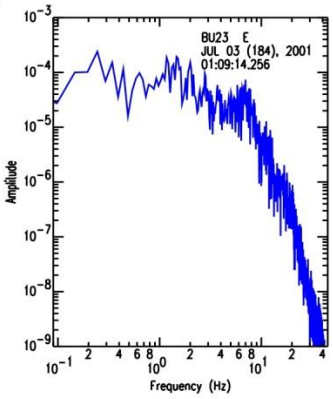
Réplica 103



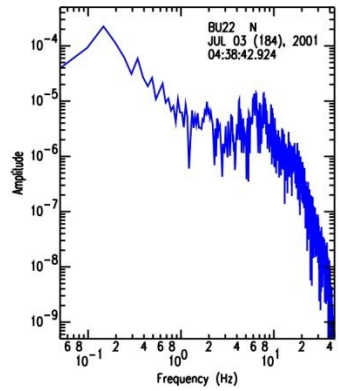


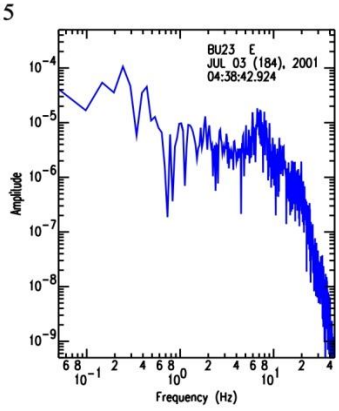
Réplica 110



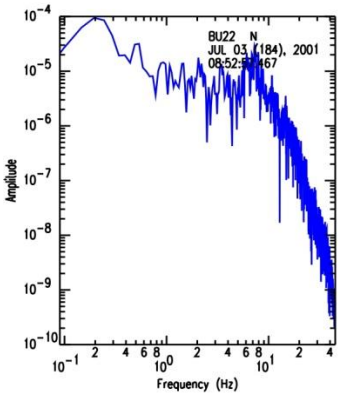


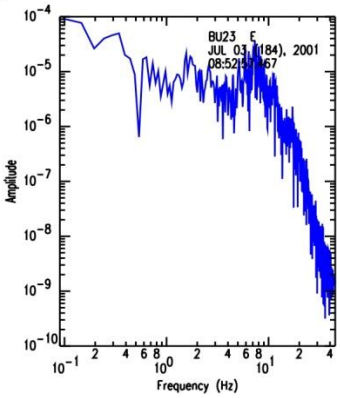
Réplica 115





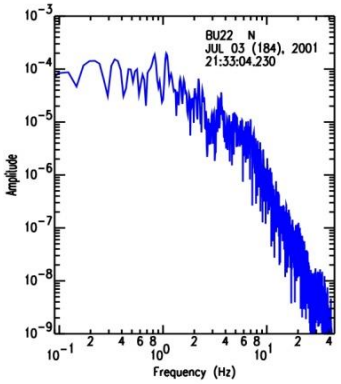
Réplica 125

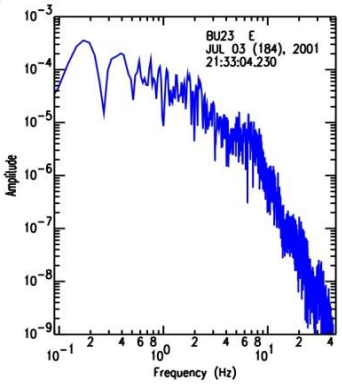




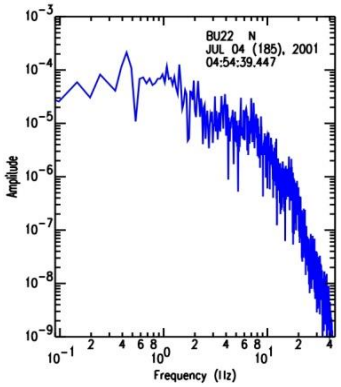
d. Continuación

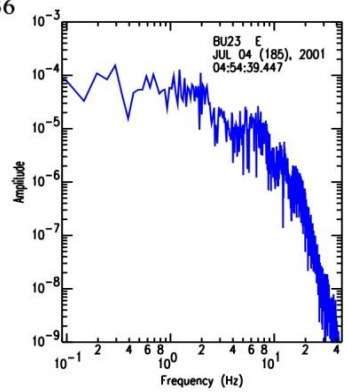
Réplica 131



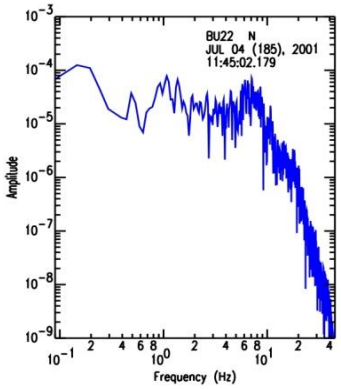


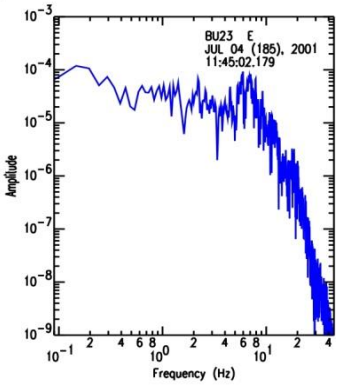
Réplica 136



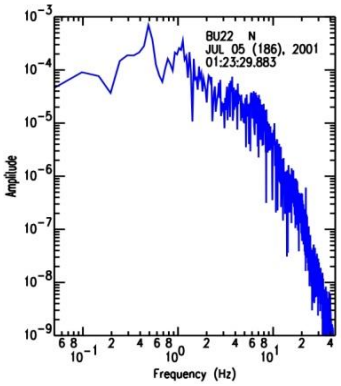


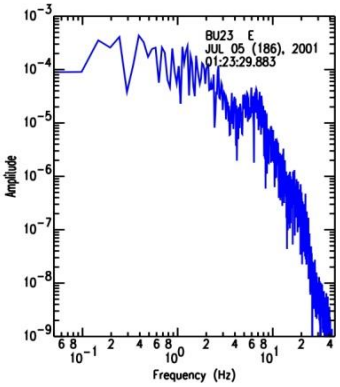
Réplica 149





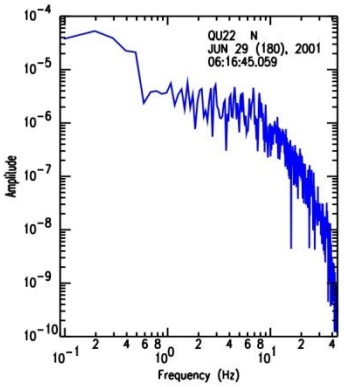
Réplica 161

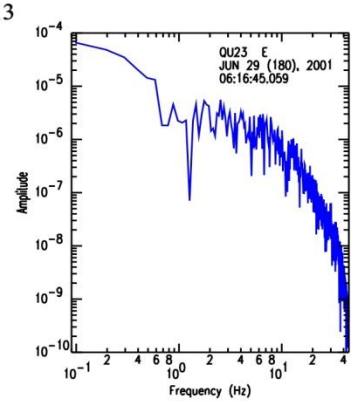




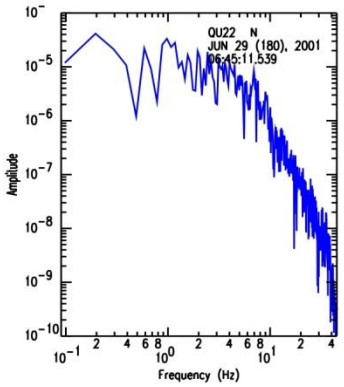
e. Estación Quilca

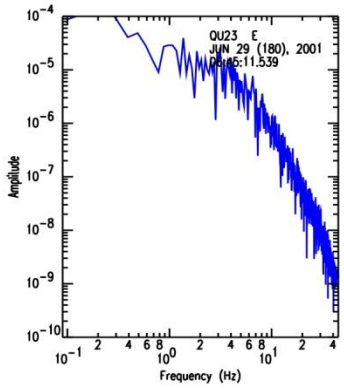
Réplica 13



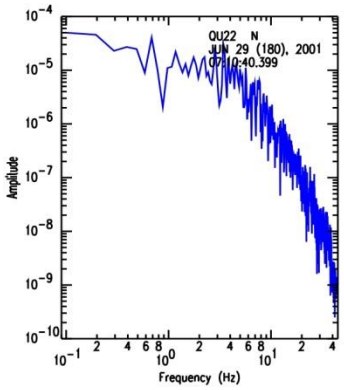


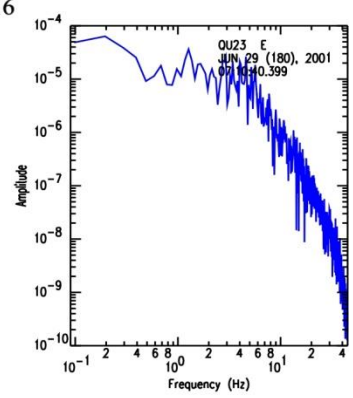
Réplica 15



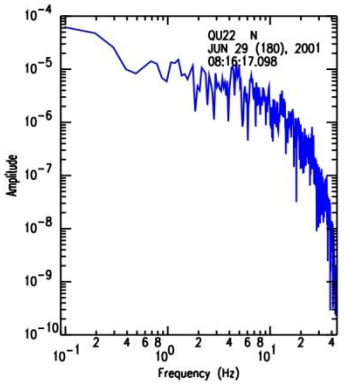


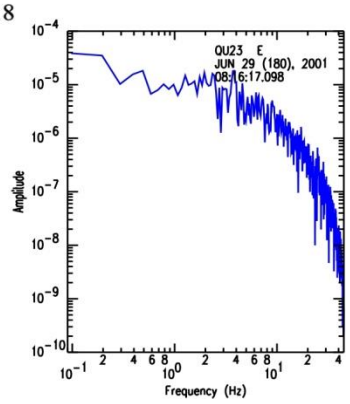
Réplica 16





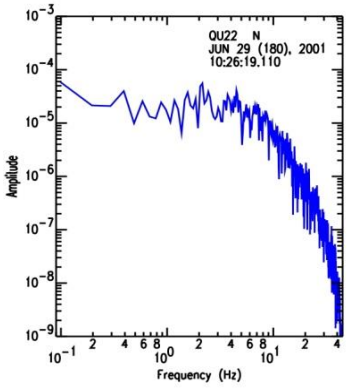
Réplica 18

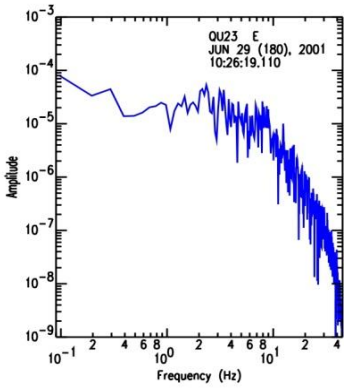




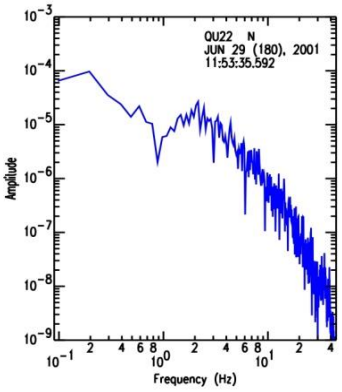
e. Continuación

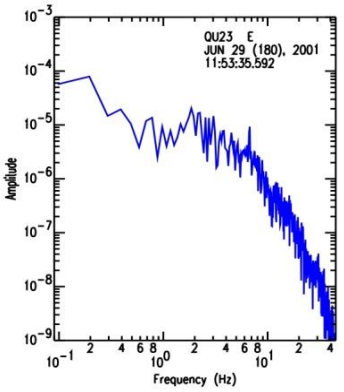
Réplica 20



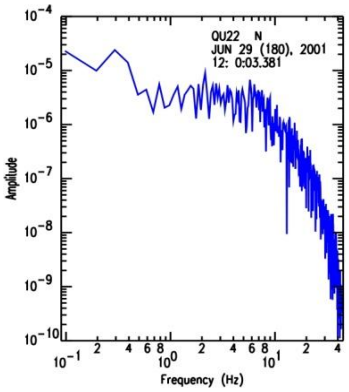


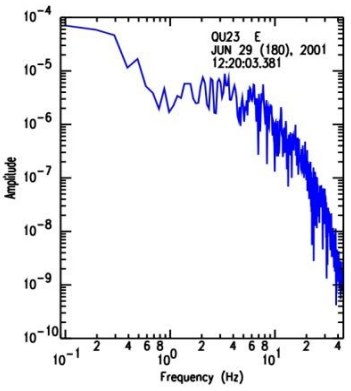
Réplica 22



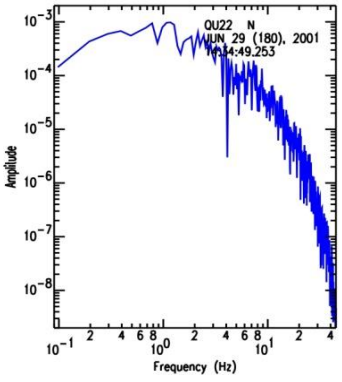


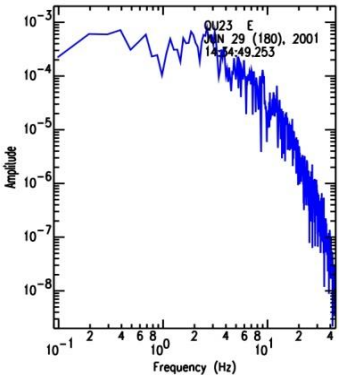
Réplica 24





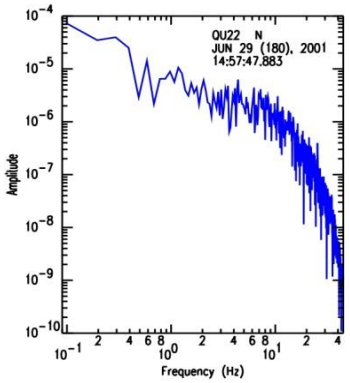
Réplica 25

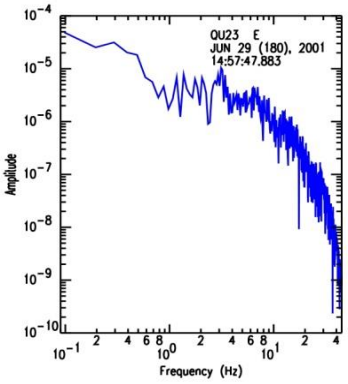




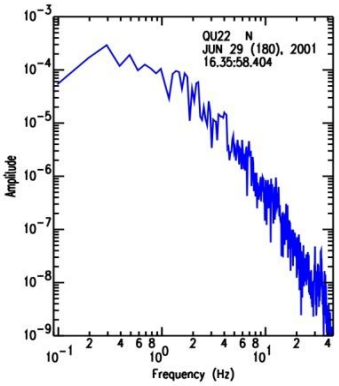
e. Continuación

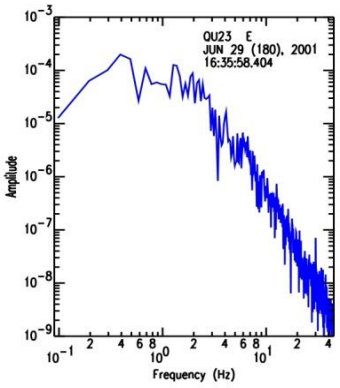
Réplica 27



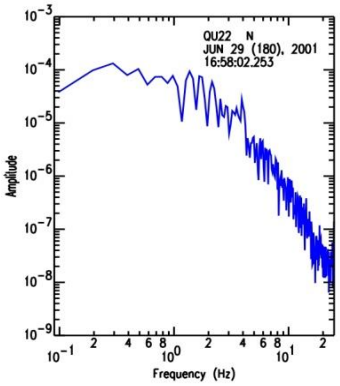


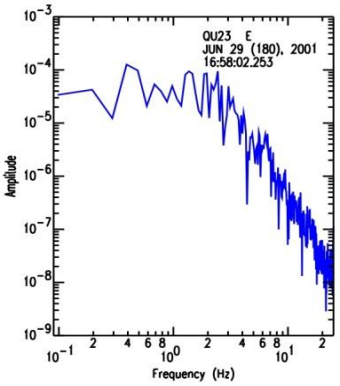
Réplica 28



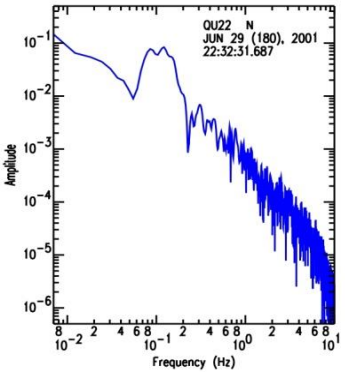


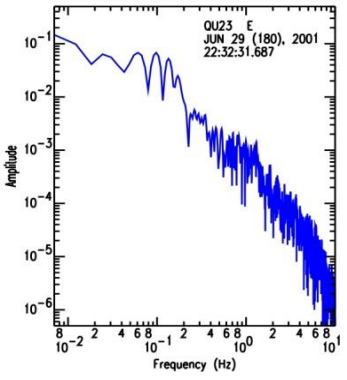
Réplica 30





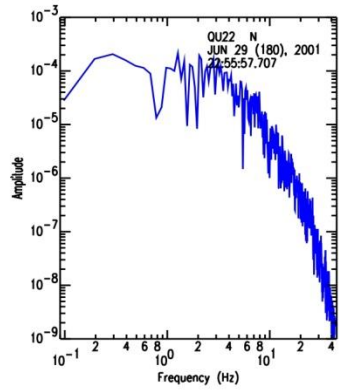
Réplica 32

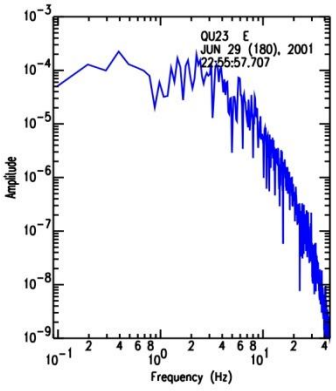




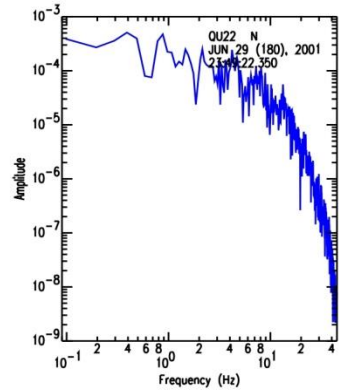
e. Continuación

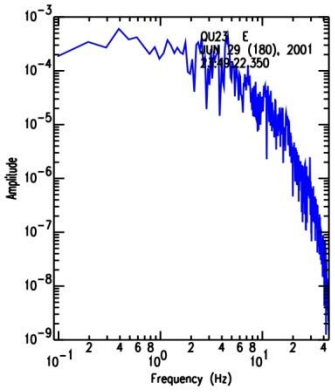
Réplica 34



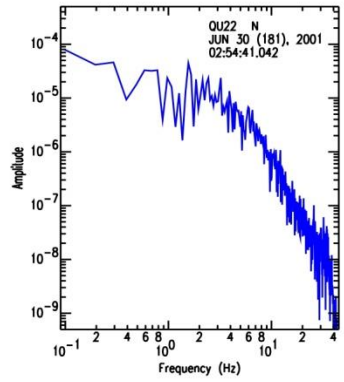


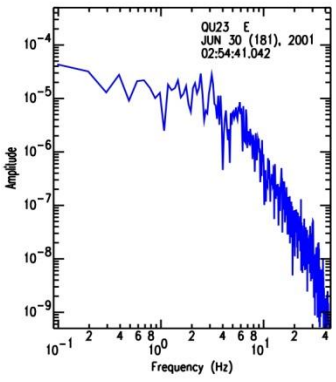
Réplica 36



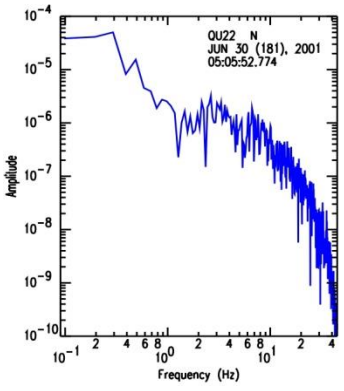


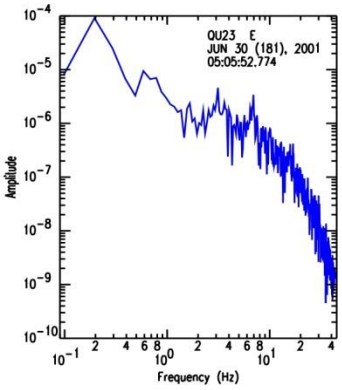
Réplica 38





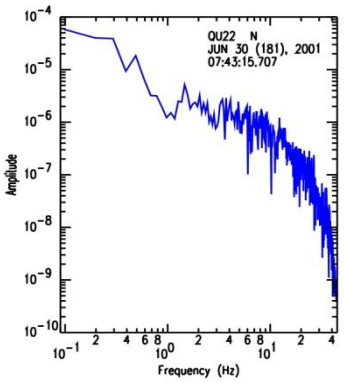
Réplica 40

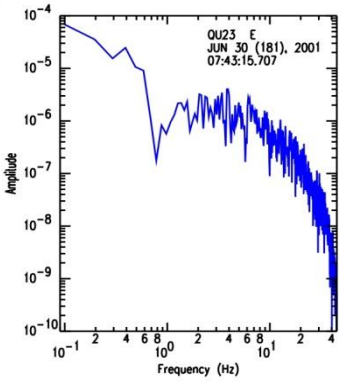




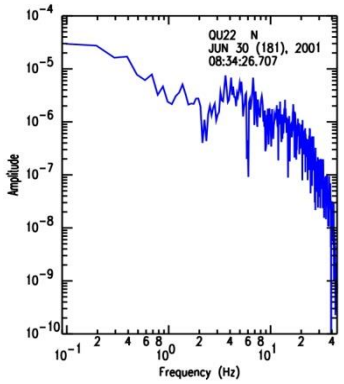
e. Continuación

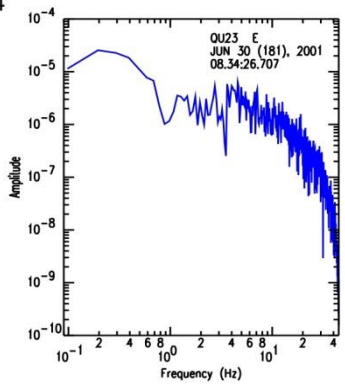
Réplica 42



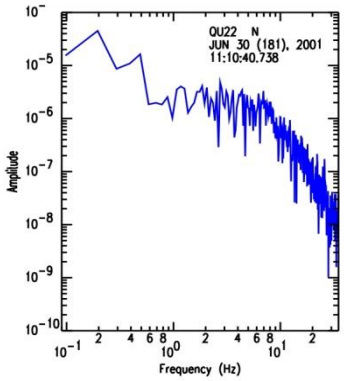


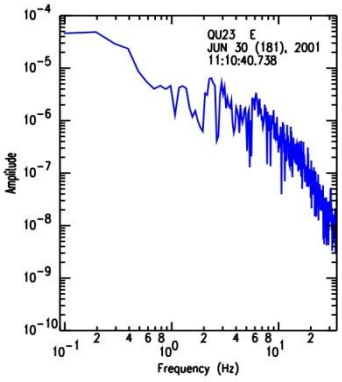
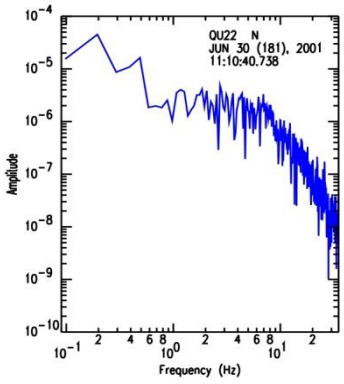
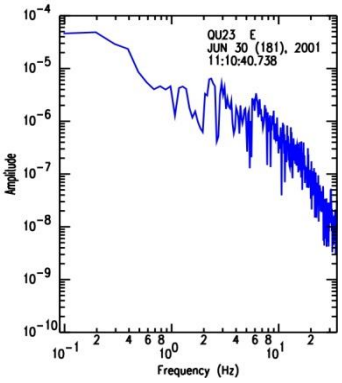
Réplica 44





Réplica 46





Réplica 47