

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Instituto de Geofísica



**Sismicidad del Volcán Popocatepetl durante
el crecimiento de dos domos de lava en
Agosto de 2001**

T E S I S

para obtener el grado de Maestro en Ciencias en el área
de Sismología

Presenta:
Fernando Gómez Santiago

Asesor:
Dr. Carlos Valdés González

SEPTIEMBRE DE 2009

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Sin Dios se puede ser buen hombre, culto
y muy productivo para la nación
—Ignacio Ramírez, El Nigromante*

Agradecimientos

Agradezco a mis papás Porfirio y Diony el apoyo brindado durante mis estudios de maestría; ustedes siempre serán la motivación para cumplir mis metas.

A Gris, mi esposa, compañera y amiga... y algunas veces no tan amiga (je, je, je), quien siempre me apoyó a seguir con este proyecto a pesar de las carencias que sufrimos; gracias por todo preciosa.

A mis hijos Jorge, Andrea y Antonio les dedico con mucho cariño esta tesis, gracias por su paciencia.

A mis hermanos Juan (su esposa Paty), Toño y Quello; a mi hermano Miguel por apoyarme en las situaciones difíciles; a mis suegros Don Leo y Doña Leona gracias por todo su apoyo; a mis cuñados Leo, Rojo y Esmeralda por su apoyo moral.

Alonso Torres, gracias por tus sugerencias que ayudaron a mejorar este trabajo; también por haber hecho divertida mi estancia en el IGF (cuando coincidíamos) mientras tú y Miguel estaban haciendo sus tesis de licenciatura.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por la oportunidad de estudiar la maestría; gracias por seguir siendo gratuita. Gracias al Instituto de Geofísica, Departamento de Sismología y al Departamento de Posgrado por permitirme usar sus instalaciones; a Araceli Chamán del Posgrado por su invaluable servicio. Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

Gracias al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y a Alicia Martínez Bringas por proporcionarnos los datos sismológicos de la red de monitoreo del volcán Popocatepetl.

Al Dr. Carlos Valdés por ser mi tutor, por compartir sus conocimientos y por todo el apoyo administrativo y logístico brindado durante mi estancia y salida del IGF, estoy muy agradecido con usted.

Gracias a mis profesores e investigadores del IGF en orden alfabético: doctores Carlos Valdés, Javier Pacheco, Juan Martín Gómez (en Juriquilla, Qro.), Claus Siebe, Leticia Flores, Lucca Ferrari, Juan Manuel Espíndola, Raúl Valenzuela, Shri Krishna Singh, Tomás Morales y Vladimir Kostoglodov.

A mis sinodales que contribuyeron en el mejoramiento de este trabajo también en orden alfabético: doctores Javier Pacheco, Juan Carlos Mora, Luis Quintanar y Philippe Lesage (Université de Savoie, Francia); agradezco sus fuertes y constructivas críticas, comentarios y sugerencias.

Septiembre de 2009

Resumen

El volcán Popocatépetl es un estratovolcán cuaternario andesítico-dacítico localizado a 60 km al sureste de la ciudad de México y a 45 km al oeste de la ciudad de Puebla. Tiene una elevación aproximada de 5452 msnm y un cráter en forma de elipse con un eje mayor de 800 m y 600 m en su eje menor, su edificio ocupa un área de 500 km^2 y abarca los estados de México, Puebla y Morelos.

Durante los últimos 20000 años, la actividad fue caracterizada por mínimo 7 grandes erupciones plinianas que produjeron caída de pómez y depósitos de flujos de ceniza. Las tres erupciones explosivas más recientes ocurrieron en un período de asentamientos humanos entre los años 3195 y 2830 AC, 800 y 215 AC y finalmente en los años 675 y 1905 de nuestra era con efectos devastadores.

La actividad reciente se caracteriza por la emisión de lava que al acumularse provoca el crecimiento de una estructura dómica; eventos similares se han registrado en 1919 y 1927 seguidos de un período de calma de 70 años. El 21 de Diciembre de 1994 ocurrieron una serie de erupciones de tipo explosivas las cuales emitieron productos piroclásticos del tamaño de las cenizas. Estas llegaron a depositarse en la ciudad de Puebla, cuyas autoridades ante semejante evento evacuaron a 75,000 personas. Desde entonces, el Popocatépetl ha permanecido en un estado de actividad volcánica y sísmica permanente. Después de este período inicial caracterizado por actividad explosiva freática, en marzo de 1996 el volcán entró en una fase volcánica de tipo efusiva el cual continúa activamente, y esta actividad ha provocado la formación de al menos 8 domos dacíticos que se emplazaron en el cráter. La actividad efusiva ha sido acompañada por actividad explosiva que destruye los domos formados por la actividad precedente.

El 9 de Agosto de 2001 comenzó un episodio de crecimiento de un domo de lava que comenzó al mismo tiempo que se registró un incremento en la sismicidad del volcán; el 10 de Agosto se realizó un vuelo patrocinado por la secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Las fotografías aéreas tomadas en este vuelo mostraron que un domo fue emplazado en la parte baja del cráter interno y que se formó posteriormente a la destrucción de un domo dearrrollado en diciembre de 2000. El 15 de Agosto a las 15:45 horas comenzó un nuevo episodio de mayor actividad sísmica similar a la del 9 de Agosto, pero con mayores emisiones de ceniza y vapor de agua; debido a esto, se formó un domo sobre el primero, pero de menor volumen.

Pequeñas cantidades de ceniza a partir de estas emisiones cayeron en la parte noroeste y este del volcán en San Pedro Nexapa, Amecameca, Ozumba, Atlautla y San Juan Tehuiztitlán. La actividad volcánica decreció el 16 de Agosto a las 13:15 horas tiempo local; durante la noche se observó una fuerte actividad incandescente en la cima del volcán y a las 5:38 horas se registró una explosión que provocó que fragmentos incandescentes fueran proyectados a más de 500 metros de distancia del cráter en el flanco norte del volcán.

La actividad sísmica y volcánica regresaron a los niveles normales a las 22:00 horas del 16 de Agosto con pequeñas emisiones volcánicas y períodos de tremores de alta frecuencia y baja amplitud.

Los datos sísmicos registrados durante las dos etapas de emisión de lava que generaron los dos domos de lava contienen eventos de tipo LP's (Eventos de Período Bajo por sus siglas en inglés); las ondas P de estos eventos se presentan en los sismogramas como ondas que emergen suavemente y no se observa el arribo de las ondas S. en este trabajo se visualizaron todos los registros y se seleccionaron 67 eventos para localizar sus fuentes por medio del método de polarización usando los sismómetros de período corto de tres componentes de la red de monitoreo sísmico del CENAPRED instalado en el Popocatepetl.

Las frecuencias dominantes obtenidas durante las dos etapas de actividad volcánica y sísmica se encuentran en el rango de 1.75 a 3.5 Hz (La frecuencia de 2 Hz es característica de eventos tipo LP en el Volcán Popocatepetl); estas se estabilizaron en 2 Hz después de la formación de cada domo; la localización de los eventos LP se realizó analizando la polarización y el movimiento de partículas de los registros filtrados en la frecuencia dominante respectiva.

Las localizaciones de los eventos LP muestran una actividad somera cercana al cráter entre 2700 y 4200 msnm durante los días 9 y 10 de Agosto y se encuentran dispersos en este rango de elevaciones. Los días 15 y 16 de Agosto las elevaciones se encuentran entre 3100 y 4200 msnm, éstas se mantienen estables en promedio en 4000 y 2900 msnm antes y después de la etapa extrusiva respectivamente. La primera etapa está relacionada con las presiones en las fracturas durante el ascenso de material ígneo al comienzo de la actividad volcánica, mientras que en la segunda etapa los días 15 y 16 las altitudes de las localizaciones son más estables debido a que ya se había liberado la energía durante la primera etapa.

Índice general

Índice de cuadros	III
Índice de figuras	IV
1. Introducción	1
1.1. Volcán Popocatepetl	1
1.2. Actividad reciente	2
1.3. Actividad sísmica del Volcán Popocatepetl	4
1.4. Objetivo	8
2. Consideraciones teóricas	9
2.1. RSAM	9
2.2. Polarización de ondas sísmicas	10
3. Los datos	13
3.1. Red de monitoreo del CENAPRED	13
4. Procesamiento de los datos	19
4.1. Número de eventos registrados	19
4.2. Estimación de la frecuencia dominante	27
4.2.1. FFT	27
4.2.2. Relación señal-ruido	31
4.2.3. Efectos de sitio	33
4.3. Cálculo de los parámetros de polarización de las ondas sísmicas	38
4.3.1. Programa COVMATMEX	38
5. Resultados	50
5.1. Frecuencia dominante	50
5.2. Localizaciones	51
5.3. Incertidumbres en las localizaciones	52
5.4. Eventos del 9 de agosto	54
5.5. Eventos del 10 de agosto	55
5.6. Eventos del 15 de agosto	56
5.7. Eventos del 16 de agosto	56

6. Discusión de los resultados	66
7. Conclusiones	75
A. Programas desarrollados	80
A.1. Programa covmatmex.f en FORTRAN 77	80
A.2. Subrutina jacobi.f	87
A.3. Subrutina eigensort.f	89
B. Shell en SAC (Seismic Analysis Code)	91
B.1. Programa polarizaj.m	91

Índice de cuadros

3.1. Estaciones de la red de monitoreo del CENAPRED	15
5.1. Registros para localizar del día 9 de agosto de 2001	51
5.2. Registros para localizar del día 10 de agosto de 2001	52
5.3. Registros para localizar del día 15 de agosto de 2001	53
5.4. Registros para localizar del día 16 de agosto de 2001	54
5.5. Eventos localizados del 9 de agosto de 2001	57
5.6. Eventos localizados del 10 de agosto de 2001	59
5.7. Eventos localizados del 15 de agosto de 2001	61
5.8. Eventos localizados del 16 de agosto de 2001	63

Índice de figuras

1.1. Localización del Volcán Popocatépetl (Rectángulo naranja) . . .	2
1.2. Imágen del cráter el 10 de Agosto de 2001(Tomada de Bergman(2001)[4])	5
1.3. Imágen del del cráter el 20 de Agosto de 2001 (Tomada de Bergman(2001)[4])	6
3.1. Red de monitoreo sísmico del CENAPRED. Triángulos: estaciones de período corto de tres componentes. Cuadrado: estación de período corto de 1 componente. Círculo: estación de banda ancha de tres componentes. Las curvas de nivel indican elevaciones sobre el nivel del mar	14
3.2. Sismogramas de todas las estaciones de la Red, 07:14:17 hora tiempo local	16
3.3. Estación PPJ 07:14:17 hora tiempo local	17
4.1. RSAM acumulativo obtenido del canal PPPE	20
4.2. Número de eventos registrados en la estación PPJ para cada una de las componentes: Vertical, Norte y Este de arriba a abajo respectivamente.	21
4.3. Número de eventos registrados en la estación PPX para cada una de las componentes: Vertical, Norte y Este de arriba a abajo respectivamente.	22
4.4. Número de eventos registrados en la estación PPT para cada una de las componentes: Vertical, Norte y Este de arriba a abajo respectivamente.	23
4.5. Número de eventos registrados en la estación PPC para cada una de las componentes: Vertical, Norte y Este de arriba a abajo respectivamente.	24
4.6. Número de eventos registrados en la estación PPM para cada una de las componentes: Vertical(arriba) y Norte(abajo) respectivamente.	25
4.7. Número de eventos registrados en la estación PPP(arriba:Vertical, en medio:Norte) y PPQ(Vertical: abajo)	26
4.8. Evento seleccionado del registro 07:14:17 hora tiempo local . .	28

4.9. Sismogramas de la estación PPJ Vertical, Norte y Este del registro correspondiente a las 07:14:17 hora tiempo local	29
4.10. Componente Vertical de la estación PPJ 07:14:17 hora tiempo local	29
4.11. Espectro de la componente Vertical de la estación PPJ 07:14:17 hora tiempo local	30
4.12. Espectros de las componentes de la estación PPJ 07:14:17 hora tiempo local	30
4.13. Espectros de amplitudes de la componente Vertical de la señal y ruido respectivamente (221:07:14:17).	32
4.14. Espectros de amplitudes de la componente Norte de la señal y ruido respectivamente (221:07:14:17).	32
4.15. Espectros de amplitudes de la componente Este de la señal y ruido respectivamente (221:07:14:17)	33
4.16. Razón espectral Norte/Vertical en la estación PPJ	34
4.17. Razón espectral Este/Vertical en la estación PPJ	34
4.18. Razón espectral Norte/Vertical en la estación PPX	35
4.19. Razón espectral Este/Vertical en la estación PPX	35
4.20. Razón espectral Norte/Vertical en la estación PPT	36
4.21. Razón espectral Este/Vertical en la estación PPT	36
4.22. Razón espectral Norte/Vertical en la estación PPC	37
4.23. Razón espectral Este/Vertical en la estación PPC	37
4.24. Movimiento de partícula en dirección N-S	39
4.25. Movimiento de partícula en dirección N-S	40
4.26. Movimiento de partícula con acimut de 45 grados	41
4.27. Sismogramas de las tres componentes del evento 221:16:54:17 de la estación PPJ.	42
4.28. Sismogramas de las estaciones PPJ, PPX, PPT y PPC con el evento 221:16:54:17.	43
4.29. Promedio de los espectros de los registros de todas las estaciones del evento 221:16:54:17	44
4.30. Parámetros de polarización obtenidos a partir de las componentes horizontales PPJE vs PPJN de la estación PPJ(evento 221:16:54:17): Componentes Norte y Este respectivamente filtrados con un filtro pasa-banda de 1.50-2.00 Hz, ángulo medido a partir del norte(acimut), linealidad del movimiento de la partícula y correlación entre los sismogramas. El diagrama de roseta se geneó con el acimut vs la linealidad de la zona sombreada.	45
4.31. Evento 221:16:54:17. Plano topográfico del Popocatepetl con las rosetas de polarización: linealidad(radio) y ángulo medido a partir del norte(acimut).	46

4.32. Evento 221:16:54:17. Plano topográfico del Popocatépetl con los diagramas de movimiento de partículas con el evento 221:16:54:17 localizado.	47
4.33. Perfil topográfico N-S del Popocatépetl con los parámetros de polarización estimados linearidad(radio) y ángulo medido a partir del eje vertical positivo en sentido de las manecillas del reloj.	48
4.34. Perfil topográfico N-S del Popocatépetl con el movimiento de la partícula de cada estación.	48
4.35. Perfil topográfico E-W del Popocatépetl con los parámetros de polarización estimados linearidad(radio) y ángulo medido a partir del eje vertical positivo en sentido de las manecillas del reloj.	48
4.36. Perfil topográfico E-W del Popocatépetl con el movimiento de la partícula de cada estación.	49
5.1. Frecuencias dominantes de los eventos localizados del 9 al 16 agosto de 2001	55
5.2. Angulo de incidencia y dirección del movimiento de la partícula de una superficie libre inclinada. Tomado de Neuberg, et. al.,(2000)[19]	55
5.3. Angulo de incidencia vs ángulo obtenido a partir de la dirección del movimiento de la partícula. Tomado de Neuberg, et. al.,(2000) [19]	56
5.4. Eventos localizados del 9 de Agosto de 2001 (221)	58
5.5. Eventos localizados del 9 de Agosto de 2001 (221) Perfil N-S .	58
5.6. Eventos localizados del 9 de Agosto de 2001 (221) Perfil E-O .	59
5.7. Eventos localizados del 10 de Agosto de 2001 (222)	60
5.8. Eventos localizados del 10 de Agosto de 2001 (222) Perfil N-S	60
5.9. Eventos localizados del 10 de Agosto de 2001 (222) Perfil E-O	61
5.10. Eventos localizados del 15 de Agosto de 2001 (227)	62
5.11. Eventos localizados del 15 de Agosto de 2001 (227) Perfil N-S	62
5.12. Eventos localizados del 15 de Agosto de 2001 (227) Perfil E-O	63
5.13. Eventos localizados del 16 de Agosto de 2001 (228)	64
5.14. Eventos localizados del 16 de Agosto de 2001 (228) Perfil N-S	64
5.15. Eventos localizados del 16 de Agosto de 2001 (228) Perfil E-O	65
6.1. Imágen del volcán cortesía del CENAPRED	68
6.2. Eventos 9-16 de agosto de 2001	69
6.3. Vista 3D del volcán con la secuencia de los eventos del 9-16 Agosto de 2001	70
6.4. Eventos 9-16 de agosto Perfil N-S	71
6.5. Eventos 9-16 de agosto de 2001 Perfil E-W	72

6.6. Elevación vs Tiempo 9-16 Agosto de 2001	72
6.7. Longitud vs Tiempo 9-16 Agosto de 2001	73
6.8. Latitud vs Tiempo 9-16 Agosto de 2001	73

Capítulo 1

Introducción

1.1. Volcán Popocatépetl

El volcán Popocatépetl es un estratovolcán cuaternario andesítico-dacítico localizado a 60 km al sureste de la ciudad de México y a 45 km al oeste de la ciudad de Puebla. Tiene una elevación aproximada de 5452 msnm y un cráter en forma de elipse con un eje mayor de 800 m y 600 m en su eje menor, su edificio ocupa un área de 500 km^2 y abarca los estados de México, Puebla y Morelos(Figura 1.1).

El basamento del área consiste de calizas cretácicas, areniscas y evaporitas que fueron depositadas desde el Cretácico tardío al Terciario temprano. La intrusión de granodioritas en el Terciario generaron aureolas debido a los contactos metamórficos con la roca madre. Estas rocas afloran al sur del Popocatépetl en los estados de Puebla y Morelos. El cono actual no es el primer edificio volcánico más alto en el sitio; evidencias de depósitos de avalancha hacia el sur del cráter demuestran la existencia previa de grandes conos que fueron destruídos por colapso gravitacional. El último colapso gravitacional ocurrió entre 24000 y 22000 años. Las lavas más antiguas del Popocatépetl fueron fechadas en 900 mil años por el método K-Ar. El edificio del volcán Popocatépetl es cortado por la Barranca de Nexpayantla en el flanco noroeste. La pared de esta barranca llamada Ventorrillo representa el remanente de un cono más antiguo destruído.

El presente cono consiste principalmente de lavas interestratificadas y depósitos piroclásticos de composición andesítica a dacítica. Durante los últimos 20000 años, la actividad fue caracterizada por mínimo 7 grandes erupciones plinianas que produjeron caída de pómez y depósitos de flujos de ceniza. Las tres erupciones explosivas más recientes ocurrieron en un período de asentamientos humanos entre los años 3195 y 2830 AC, 800 y 215 AC y finalmente

en los años 675 y 1905 de nuestra era con efectos devastadores.

Debido a que los intervalos de tiempo entre las grandes erupciones plinianas que produjeron la ceniza son relativamente largos (1000-3000 años) y debido a que el área ha sido repoblada con la disponibilidad de agua y suelo agrícola productivo, una erupción cataclísmica de la misma magnitud podría tener efectos devastadores de dimensiones sin precedentes; es por esto que estrategias efectivas de prevención de desastres tienen que ser desarrollados por las agencias de protección civil(Siebe et, al.(2003) [21]).

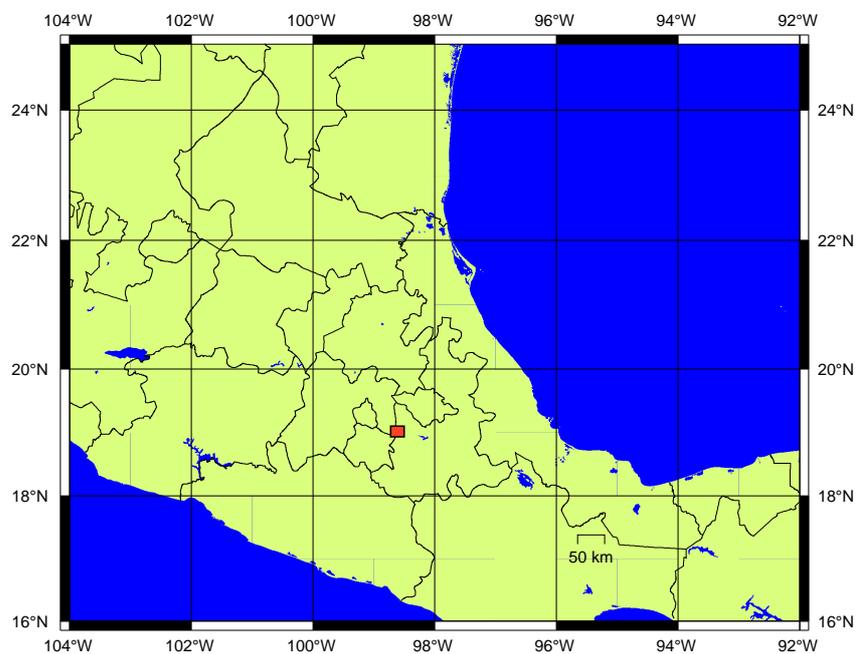


Figura 1.1: Localización del Volcán Popocatépetl (Rectángulo naranja)

1.2. Actividad reciente

La actividad reciente se caracteriza por la emisión de lava que al acumularse provoca el crecimiento de una estructura dómica; eventos similares se han registrado en 1919 y 1927 seguidos de un período de calma de 70 años. El 21 de Diciembre de 1994 ocurrieron una serie de erupciones de tipo explosivas las cuales emitieron productos piroclásticos del tamaño de las cenizas. Estas llegaron a depositarse en la ciudad de Puebla, cuyas autoridades ante semejante evento evacuaron a 75,000 personas. Desde entonces, el Popocatépetl ha permanecido en un estado de actividad volcánica y sísmica permanente. Después de este período inicial caracterizado por actividad explosiva freática,

en marzo de 1996 el volcán entró en una fase volcánica de tipo efusiva el cual continúa activamente, y esta actividad ha provocado la formación de al menos 8 domos dacíticos que se emplazaron en el cráter. La actividad efusiva ha sido acompañada por actividad explosiva que destruye los domos formados por la actividad precedente.

Valdes(Comunicación Personal) clasifica la sismicidad en 15 etapas diferentes que describen la evolución de la actividad sísmica en el Volcán Popocatepetl, para el intervalo de tiempo comprendido entre diciembre de 1994 y diciembre del 2003, basando el análisis en la localización de hipocentros, características de la forma de onda para varios tipos señales sismo-volcánicas y mediciones de amplitud de la onda. Las etapas evolutivas son las siguientes:

1. Fase de preparación (1 de enero de 1992 a 22 de octubre de 1994).
2. Fase premonitoria (23 de octubre de 1994 a 21 de diciembre de 1994).
3. Fase eruptiva (21 de diciembre de 1994 a 1 de abril de 1995).
4. Fase fumarólica (2 de abril de 1995 a 3 de marzo de 1996).
5. Fase de construcción del primer domo (4 de marzo de 1996 a septiembre de 1996).
6. Fase de actividad pulsante cuasicíclica (octubre de 1996 a 18 de agosto de 1997).
7. Formación del gran domo (19 de agosto de 1997 a 24 de diciembre de 1997).
8. Fase explosiva y de acumulación de energía (25 de diciembre de 1997 a 22 de noviembre de 1998).
9. Fase muy explosiva (23 de noviembre de 1998 a 3 de enero de 1999).
10. Fase post-eruptiva y de relajación (4 de enero de 1999 a 3 de septiembre de 1999).
11. Fase de recarga debilitada (4 de septiembre de 1999 a 15 de septiembre del 2000).
12. Fase de recarga (16 de septiembre del 2000 a 10 de diciembre del 2000).
13. Fase eruptiva intensa y de rápido crecimiento del domo (11 de diciembre del 2000 a 23 de enero del 2001).

14. Fase post-eruptiva y de construcción repetitiva del domo (24 de enero del 2001 a junio del 2002).
15. Obstrucción del conducto y regreso a una etapa de baja actividad. La actividad durante ese período consistió de pequeñas y esporádicas exhalaciones de vapor de agua y gas, aproximadamente 10 por día. También se registraron 18 sismos volcanotectónicos con magnitudes entre 2.0 y 2.5 (1 de junio del 2002 a diciembre del 2003).

El 9 de agosto de 2001 comenzó un episodio de crecimiento de un domo de lava que comenzó al mismo tiempo que se registró un incremento en la sismicidad del volcán; el 10 de agosto se realizó un vuelo patrocinado por la secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Las fotografías aéreas tomadas en este vuelo mostraron que un domo fue emplazado en la parte baja del cráter interno y que se formó posteriormente a la destrucción de un domo desarrollado en diciembre de 2000. El 13 de agosto, el domo tenía 190 m de diámetro y 30 m de altura. El 15 de agosto a las 15:45 horas comenzó un nuevo episodio de mayor actividad sísmica similar a la del 9 de agosto, pero con mayores emisiones de ceniza y vapor de agua; este aumento fue atribuido a una mayor tasa de extrusión de lava; debido a esto, se formó un domo sobre el primero, pero de menor volumen (Figura 1.2).

Pequeñas cantidades de ceniza a partir de estas emisiones cayeron en la parte noroeste y este del volcán en San Pedro Nexapa, Amecameca, Ozumba, Atlautla y San Juan Tehuiztlán. La actividad volcánica decreció el 16 de agosto a las 13:15 horas tiempo local; durante la noche se observó una fuerte actividad incandescente en la cima del volcán y a las 5:38 horas se registró una explosión que provocó que fragmentos incandescentes fueran proyectados a más de 500 metros de distancia del cráter en el flanco norte del volcán.

La actividad sísmica y volcánica regresaron a los niveles normales a las 22:00 horas del 16 de agosto con pequeñas emisiones volcánicas y períodos de temores de alta frecuencia y baja amplitud; ver la figura 1.3 (CENAPRED 2001: Reporte de la actividad Agosto 2001)[5].

1.3. Actividad sísmica del Volcán Popocatépetl

La actividad sísmica generada en el Volcán Popocatépetl es variada y corresponde a mecanismos de fuente diferentes, así como atenuación en las

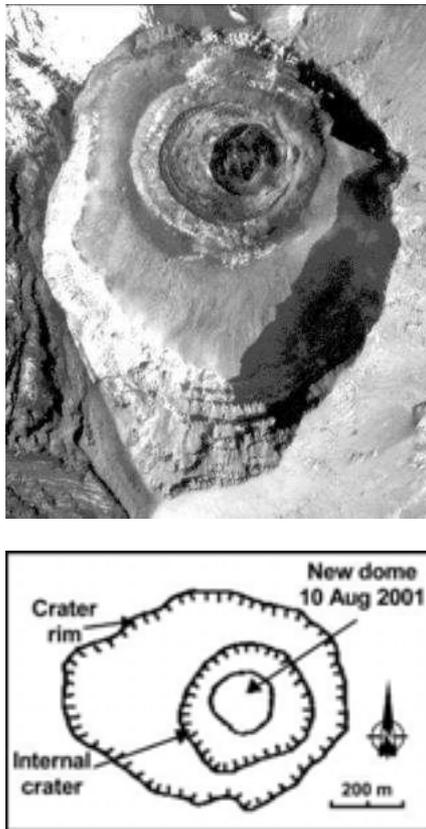


Figura 1.2: Imágen del cráter el 10 de Agosto de 2001(Tomada de Bergman(2001)[4])

ondas sísmicas por el trayecto y en algunos casos por el efecto de sitio en donde se encuentra ubicada la estación. Los volcanes activos son la fuente de una gran variedad de señales sísmicas. Tradicionalmente los sismos volcánicos han estado clasificados con base en el criterio de Minikami(1974)[16] en cuatro diferentes tipos de eventos: tipo A o de alta frecuencia, tipo B o de baja frecuencia, sismos de explosión y tremores volcánicos. Este esquema de clasificación trabaja bien en un gran número de volcanes. La clasificación de Minikami incluye un rango restringido de profundidades para varios eventos; este criterio se ha flexibilizado por el mejoramiento en la localización de los eventos y un mejor entendimiento de la fuente y de los efectos de propagación. La clasificación general de las señales sismo-volcánicas se basa en las características espectrales de las señales y no en la localización de los hipocentros (McNutt, 1996[15])y se describe a continuación con las características del Volcán Popocatepetl:

Eventos de alta frecuencia (VT). Los sismos de alta frecuencia involucran fallas y fenómenos puramente elásticos en los cuales los procesos



Figura 1.3: Imágen del del cráter el 20 de Agosto de 2001 (Tomada de Bergman(2001)[4])

magmáticos suministran la fuente de energía que conduce al fracturamiento de la roca, pero los fluidos no se involucran directamente en la dinámica de la fuente. Este tipo de fuente se presenta en la roca quebradiza alrededor del reservorio magmático (cámara magmática) y los conductos; pueden involucrar procesos de cizalla ligados a los esfuerzos inducidos por el movimiento de magma o fallas de tensión en la roca, causadas por la contracción térmica debido al enfriamiento en la cercanía del cuerpo magmático en el interior del edificio volcánico. Este tipo de fuentes están asociadas con la respuesta estructural del edificio volcánico a la intrusión y/o extracción de fluidos o a movimientos por gravedad. Las fases de las ondas P y S se distinguen claramente y las frecuencias para este tipo de eventos están definidas entre 5 y 15 Hz; estos eventos se localizan a profundidades de 3 a 10 kilómetros.

Eventos de periodo largo (LP). Los eventos de periodo largo (LP) o de baja frecuencia están relacionados con fluidos, la mayoría de los eventos LP son causados por procesos de perturbación de la presión en el fluido. En estos eventos se pueden identificar las fases emergentes de las ondas P, pero no puede ser identificada la llegada de la onda S y tienen frecuencias predominantes entre 1 y 5 Hz, siendo 2 y 3 Hz las frecuencias más comunes. La actividad de los eventos LP y los tremores volcánicos se originan en regiones particulares y con localizaciones bien definidas, controladas por las perturbaciones en el fluido.

Lermo et al.,(1995)[13], menciona que los eventos clasificados como LP's (Tipo B) en el volcán Popocatepetl, muestran una gran variedad en cuanto a su forma de onda y contenido espectral, lo cual dificulta la clasificación, por lo que hace subclasificaciones de estos eventos, y los llama como Tipo-B de alta, media y baja frecuencia. Los Tipo-B de alta frecuencia que encuentra Lermo, muestran frecuencias en el rango de 6 a 10 Hz, con fases de onda P y S bien definidas, estos eventos podrían llegar a ser de tipo volcano-tectónico,

ya que la diferencia entre S-P es de unos pocos segundos y su alto contenido de frecuencias sugieren un mecanismo de doble par. Los Tipo-B de frecuencia media tienen una fase P emergente y la fase S es difícil de distinguir, presentan frecuencias dominantes alrededor de 6 Hz, mientras que la duración es mayor a 30 segundos y al final del evento se observan frecuencias alrededor de los 2 Hz. Estos eventos podrían ser los de Tipo H, clasificados por Valdés, et al.,(1995), en donde se produce una fractura debida a altas presiones producidas por líquidos o gases, y luego hay una intrusión de este mismo material el cual genera las bajas frecuencias. Finalmente se encuentran los eventos Tipo-B de baja frecuencia, estos eventos presentan frecuencias dominantes entre 2 y 4 Hz, así como un arribo de ondas P emergentes, y una onda S difícil de distinguir, esta definición corresponde a los eventos de LP's propuesta por Valdés.

Sismos de explosión. Los sismos de explosión acompañan las erupciones explosivas y muchos están caracterizados por la presencia de una onda de choque de aire en los sismogramas. En este tipo de eventos hay una partición de la energía en la fuente: una parte de la energía viaja a través del terreno como ondas sísmicas y otra parte viaja a través de aire como ondas de aire o acústicas, para después acoplarse en el terreno. Estos eventos tienen una onda P de tipo emergente, las frecuencias dominantes se encuentran entre 1 a 5 Hz, la duración de los eventos es de aproximadamente unos 40 segundos.

Tremores Volcánicos. Los tremores están caracterizados por una señal de amplitud sostenida que dura desde minutos, días y algunas veces hasta meses o más. Las frecuencias dominantes en los tremores están definidas entre 1 y 5 Hz, siendo las frecuencias más comunes 2 y 3 Hz. Son similares a los eventos LP. Muchos investigadores sostienen la idea de que los tremores son una serie de eventos LP que ocurren a intervalos de unos pocos segundos. Los tremores armónicos y espasmódicos son dos casos especiales dentro de los tremores volcánicos. Los tremores armónicos son de baja frecuencia y se tienen ondas senoidales con una variación suave en la amplitud, algunas veces constan de una frecuencia fundamental con varias frecuencias secundarias. Los tremores espasmódicos son pulsantes y tienen una señal irregular. Los tremores intermitentes se presentan regularmente en forma de trenes periódicos separados por periodos de reposo de duración uniforme.

En el volcán Popocatepetl se han generado diversos sismos con formas de onda y características espectrales bien definidas. La variación en el tiempo de estos sismos indica un cambio en los mecanismos que los generan y pueden prevenir acerca de una actividad eruptiva diferente o más intensa. El período comprendido entre el 9 y 16 de Agosto de 2001, la sismicidad observada consistió de eventos LP principalmente.

1.4. Objetivo

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar la sismicidad del volcán Popocatépetl registrada durante la etapa que corresponde al crecimiento de dos domos de lava en el período comprendido entre los días 9 y 16 de agosto de 2001 con el propósito de entender la relación entre la actividad magmática (emplazamiento del magma y formación del domo) y la actividad sísmica.

Capítulo 2

Consideraciones teóricas

2.1. RSAM

Real-time Seismic Amplitude Measurement(RSAM) es una metodología desarrollada por Endo y Murray(1992)[7] del *USGS (United States Geological Survey por sus siglas en inglés)* para resumir la actividad sísmica durante una crisis volcánica. Esta técnica es usada para caracterizar el cambio en la sismicidad de un volcán en tiempo real. Esta herramienta calcula la amplitud promedio de la señal en simómetros individuales en lugar de localizar y cuantificar la magnitud de los eventos sísmicos. Durante una crisis volcánica, la sismicidad normalmente llega a un nivel en el que los eventos sísmicos son difíciles de distinguir; los registros sísmicos analógicos proveen alguna información, pero no proveen un análisis cuantitativo rápido. RSAM provee información cuantitativa durante períodos de intensa sismicidad antes de una erupción volcánica; es precisamente durante estos períodos en que la necesidad de medir cuantitativamente la información sísmica es más crítica (Bergman, E. 2001)[4] y (USGS, 2005)[9].

RSAM calcula la amplitud promedio de los registros sísmicos en intervalos de tiempo constantes (10 minutos para el Popocatépetl); El incremento en la amplitud de los tremores o tasa de ocurrencia y el tamaño de los eventos causan que los valores de RSAM se incrementen. En vez de enfocarse en los eventos individuales, RSAM suma las señales de todos los eventos durante intervalos de 10 minutos para proveer información simplificada pero muy útil acerca del nivel de la actividad sísmica.

RSAM no distingue entre actividad volcánica y otras fuentes de vibración del terreno como el viento, alguien caminando cerca de la estación, o un gran sismo regional; debido a esto, se debe tener cuidado para no confundir el ruido del viento u otras señales no volcánicas con el de la actividad volcánica.

Este sistema ha sido utilizado en varios volcanes en las últimas dos décadas y ha demostrado ser útil en crisis volcánicas como en el volcán Pinatubo, Filipinas(1991), en el Redoubt, Alaska(1989), Santa Elena(1991), así como en el volcán de Colima(1998) (Arámbula, 2002)[2]. En el Monte Santa Elena, RSAM produjo 16 alarmas debido a eventos sísmicos explosivos, 22 alarmas debidas a caída de roca, 1 asociada a un sismo, 12 a eventos regionales y 6 a problemas de telemetría (USGS, 2005) [9].

2.2. Polarización de ondas sísmicas

La detección e interpretación de los eventos sísmicos requieren del conocimiento de las características de la señal y el ruido. Para enfatizar los eventos de interés, es común aplicar un filtro pasabanda centrado en la frecuencia de interés; la interpretación es difícil cuando los espectros de los eventos y del ruido son similares. Una propiedad de los eventos sísmicos puede ser usada para resaltar las fases registradas, esta propiedad es la *polarización*. Las ondas compresionales y de corte presentan un alto grado de polarización lineal. El movimiento de la partícula coincide con el acimut de propagación de la energía para las fases compresionales P y es perpendicular al acimut de propagación para las fases transversales S. Las ondas superficiales de Rayleigh son polarizadas elípticamente en el plano Vertical-radial, los modos fundamentales despliegan movimiento retrógrado de la partícula, y los modos más altos representan movimientos progradados o elipticidad más alta. Las ondas superficiales de Love también son polarizadas linealmente, pero en un plano horizontal perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Usando las características de las trayectorias de las partículas polarizadas, pueden ser diseñados filtros que preservan el movimiento, si este satisface condiciones específicas de polarización en una dirección particular y atenúa movimiento que no satisface el criterio deseado. Los filtros de polarización pueden ser más útiles que los filtros de frecuencias para aumentar la razón señal ruido, particularmente cuando la señal y el ruido tienen características espectrales similares (Montalbetti y Kanasewich (1970))[17].

Montalbetti y Kanasewich(1970)[17] presentaron un método para analizar la polarización de ondas sísmicas producidas por un telesismo. La linearidad y la dirección del movimiento de la partícula son obtenidas a partir de la matriz de covarianza de las tres componentes del movimiento del terreno en un intervalo corto de tiempo. La medición de la linearidad es obtenida diagonalizando la matriz y formando una función que involucra los ejes principales

más grande y el intermedio respectivamente. La dirección de polarización es encontrada a partir del eigenvector del eje principal más grande; una serie de operadores que varían en tiempo son obtenidos y actúan como control de ganancia para resaltar las fases principales del registro y atenuar ruido o señal no deseada. El método propuesto por Montalbetti y Kanasevich(1970)[17] fue usado para analizar registros de un terremoto ocurrido en las Filipinas el 30 de Enero de 1969 que resaltó las fases P, pP, sP, PP y S principalmente.

Para una señal sísmica registrada en un sismómetro de tres componentes, se especifica una ventana de tiempo de longitud $N\Delta T$, donde ΔT es el intervalo de muestreo. Para determinar la matriz de covarianza para esta serie de observaciones, la media, varianza y covarianza tienen que ser calculadas para las componentes Vertical, Norte y Este respectivamente.

La media se define como el valor esperado de N observaciones de la variable aleatoria $X_{1i}(i = 1, 2, \dots, N)$ como:

$$\mu_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{1i} = E(X_1) \quad (2.1)$$

La covarianza entre N observaciones de dos variables X_1 y X_2 está dada por:

$$Cov[X_1, X_2] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{1i} - \mu_1)(X_{2i} - \mu_2) \quad (2.2)$$

donde μ_1 y μ_2 son calculados como en la ecuación 2.1, es evidente que:

$$Cov[X_1, X_2] = Cov[X_2, X_1] \quad (2.3)$$

La cantidad $Cov[X_1, X_1]$ se define como la auto-covarianza o simplemente la varianza $Var[X_1]$.

$$Var[X_1] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{1i} - \mu_1)^2 \quad (2.4)$$

La matriz con $Cov[X_r, X_s]$ en su r -ésima fila y s -ésima columna ($r, s = 1, 2, \dots, n$) es la matriz de covarianza de la serie de N variables aleatorias X_j , $j = 1, 2, \dots, n$. Si X es el vector de variables aleatorias y $\bar{\mu}$ el vector de medias para cada una de las variables, la matriz de covarianza V está definida como:

$$V = E[(\bar{X} - \bar{\mu})(\bar{X} - \bar{\mu})^t] \quad (2.5)$$

donde t es la traspuesta del vector columna. Para el caso de tres variables V , N y E consideradas sobre la ventana de tiempo $N\Delta t$, la ecuación anterior está representada por:

$$V = \begin{bmatrix} Var[V] & Cov[V, N] & Cov[V, E] \\ Cov[N, V] & Var[N] & Cov[N, E] \\ Cov[E, V] & Cov[E, N] & Var[E] \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Si la matriz 2.6 es diagonalizada, se puede estimar la linealidad de la trayectoria del movimiento de la partícula en una ventana de tiempo especificada a partir de la razón de los dos ejes principales de la matriz. La diagonalización introduce una rotación de los ejes de las tres componentes del sismómetro, de tal manera que el eje principal ahora apunta en la dirección de máxima amplitud.

La dirección de polarización puede obtenerse considerando el eigenvector del eje principal más grande. Si λ_1 es el eigenvalor más grande y λ_2 el segundo eigenvalor mayor de la matriz de covarianza, entonces una función de la forma

$$F(\lambda_1, \lambda_2) = 1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^n \quad (2.7)$$

sería cercano a la unidad cuando la linealidad es alta ($\lambda_1 \gg \lambda_2$) y cercana a cero cuando los dos ejes principales se aproximan uno a otro en magnitud (baja linealidad). La dirección de polarización puede ser determinada considerando las componentes del eigenvector asociado con el eigenvalor más grande de la matriz.

La función 2.7 es estimada para cada movimiento ΔT equivalente al intervalo de muestreo del registro sísmico, resultando un operador que modula las amplitudes de los registros.

Capítulo 3

Los datos

3.1. Red de monitoreo del CENAPRED

El volcán Popocatepetl contaba en 2001 con una red de 6 sismógrafos triaxiales de período corto, 1 de banda ancha, 4 inclinómetros biaxiales para medir deformación, una cámara de video con enlace de microondas, un radar doppler meteorológico y diversos equipos para mediciones geodésicas, análisis químicos y determinación de las concentraciones de gases de SO_2 y CO_2 .

Más de 50 señales de telemetría son transmitidas en forma continua hacia un puesto central de registro y procesamiento localizado en el CENAPRED donde la actividad sísmica es monitoreada y procesada las 24 horas del día. Los sismómetros están localizados sobre el volcán en un radio menor de 10 km y a una altitud que varía de 3000 a 4200 msnm. La estación más cercana es canario (PPP) que se encuentra a 1.7 km al noroeste del centro del cráter con una elevación de 4170 msnm (Figura 3.1).

Los datos utilizados en este trabajo fueron obtenidos de la Red de Monitoreo Sísmico del Volcán Popocatepetl de período corto. Actualmente la red está constituida por 9 estaciones telemétricas de 1 Hz. Las estaciones se encuentran localizadas en las laderas del cono volcánico. Cubren un radio aproximado de 10 km. del cráter a altitudes de 2650 a 4452 msnm. La distancia de las estaciones al cráter varía de 2 a 10 km aproximadamente. Cada una de las estaciones está equipada con un sismómetro Mark L-4, seis de ellas de tres componentes y tres solo de componente vertical (Tabla 3.1). Su señal es transmitida teleméricamente en forma continua y en formato analógico al Centro de Registro del CENAPRED. Las señales son digitalizadas por una tarjeta de adquisición de datos a razón de 100 muestras por segundo para cada canal y se utilizó hasta 1999 el sistema automático XDETECT (Tottingham et al., 1994). A partir del año 2000 a la fecha el sistema de registro utilizado es el EARTHWORM [11].

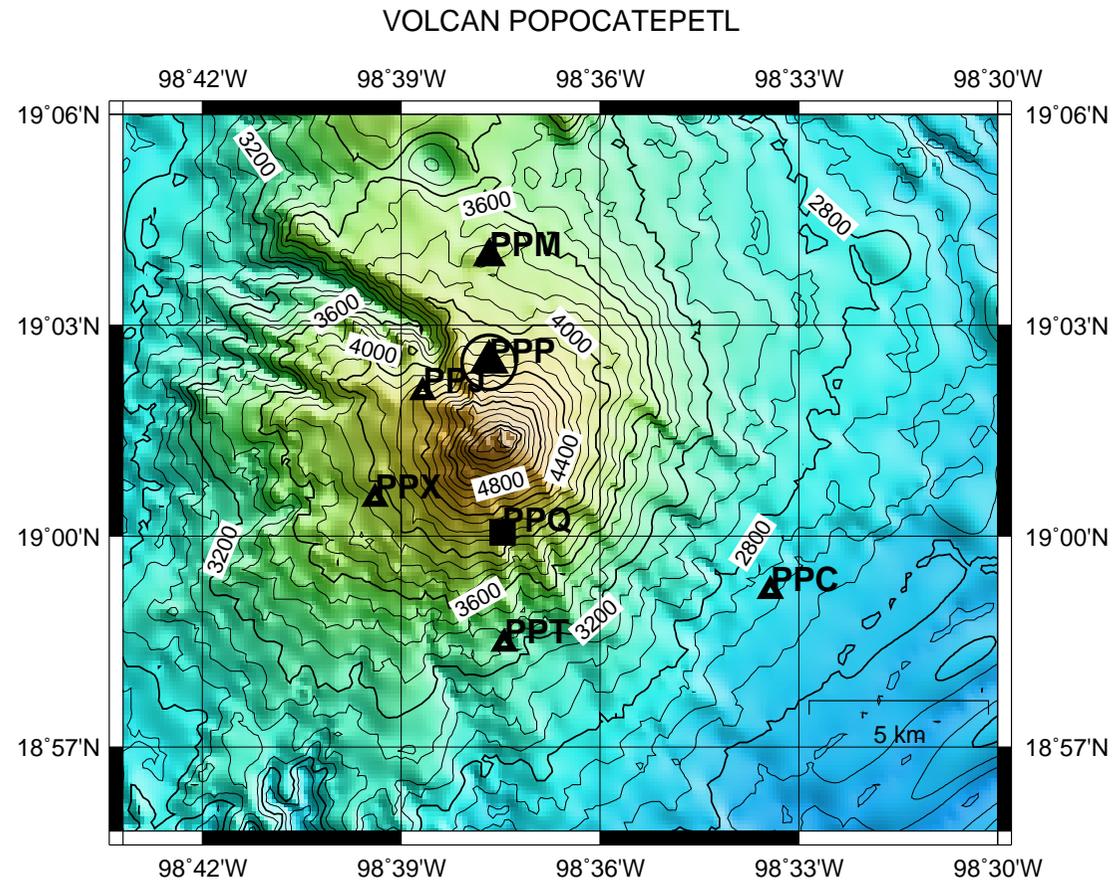


Figura 3.1: Red de monitoreo sísmico del CENAPRED. Triángulos: estaciones de período corto de tres componentes. Cuadrado: estación de período corto de 1 componente. Círculo: estación de banda ancha de tres componentes. Las curvas de nivel indican elevaciones sobre el nivel del mar

La estación Cerro de Tlamacas (PPM) fue instalada en septiembre de 1989 por el Instituto de Geofísica de la UNAM, y consta de un sismómetro triaxial de 1 Hz y un STS2. El CENAPRED instaló las demás estaciones que componen la actual red. Las estaciones PPX y PPC se instalaron en octubre y noviembre de 1994 en la ladera Suroeste y Este del volcán respectivamente, con sismómetros verticales de 2 Hz. Posteriormente a la reactivación volcánica del 21 de diciembre de 1994, en enero de 1995 se instalaron otras dos estaciones PPP y PPB en la ladera Norte y Este del volcán, con sismómetros verticales de 1 Hz (Alicia Martínez, 2003)[14].

La transferencia de los datos desde la red sismológica en el volcán Popocatepetl al CENAPRED se realiza teleméricamente. En el CENAPRED, los datos sísmicos de período corto se graban en PC en archivos formato SUDS; cada archivo SUDS contiene multiplexados los 22 canales de todas las estaciones con un tiempo de registro de 300 segundos por archivo y un intervalo de muestreo de 0.01 segundos; la frecuencia de Nyquist es de 50 Hz. Los registros de la estación de banda ancha se registran y se almacenan independientemente de los de período corto en archivos también formato SUDS, pero con longitud de registro de 10 minutos.

Estación	Nombre	Lat.	Lon.	Altitud(msnm)	Comps.
PPP	Canario	19.0412	98.6280	4170	V N E
PPPBB	Canario	19.0412	98.6280	4170	V N E
PPX	Chipiquixtle	19.0088	98.6566	3980	V N E
PPM	Tlamacas	19.0663	98.6278	3980	V N E
PPT	Tetexcaloc	18.9745	98.6241	3300	V N E
PPJ	Juncos	19.30342	98.6446	4452	V N E
PPC	Colibí	18.9870	98.5572	2650	V N E
PPQ	Los Cuervos	19.0009	98.6246	4200	V

Cuadro 3.1: Estaciones de la red de monitoreo del CENAPRED

Para la lectura y procesamiento de los datos sísmicos, se realizó la conversión a formato SAC (SEISMIC ANALYSIS CODE). La figura 3.2 muestra los sismogramas de las componentes Vertical, Norte y Este respectivamente de todas las estaciones de la red del CENAPRED el 9 de agosto de 2001 a las 07:14:17 horas tiempo local. La figura 3.3 muestra los sismogramas de las tres componentes de la estación PPJ a la misma hora.

El número total de archivos en formato SUDS analizados en este trabajo es de 359; la primera secuencia de las 03:09:17 horas del 9 de agosto hasta

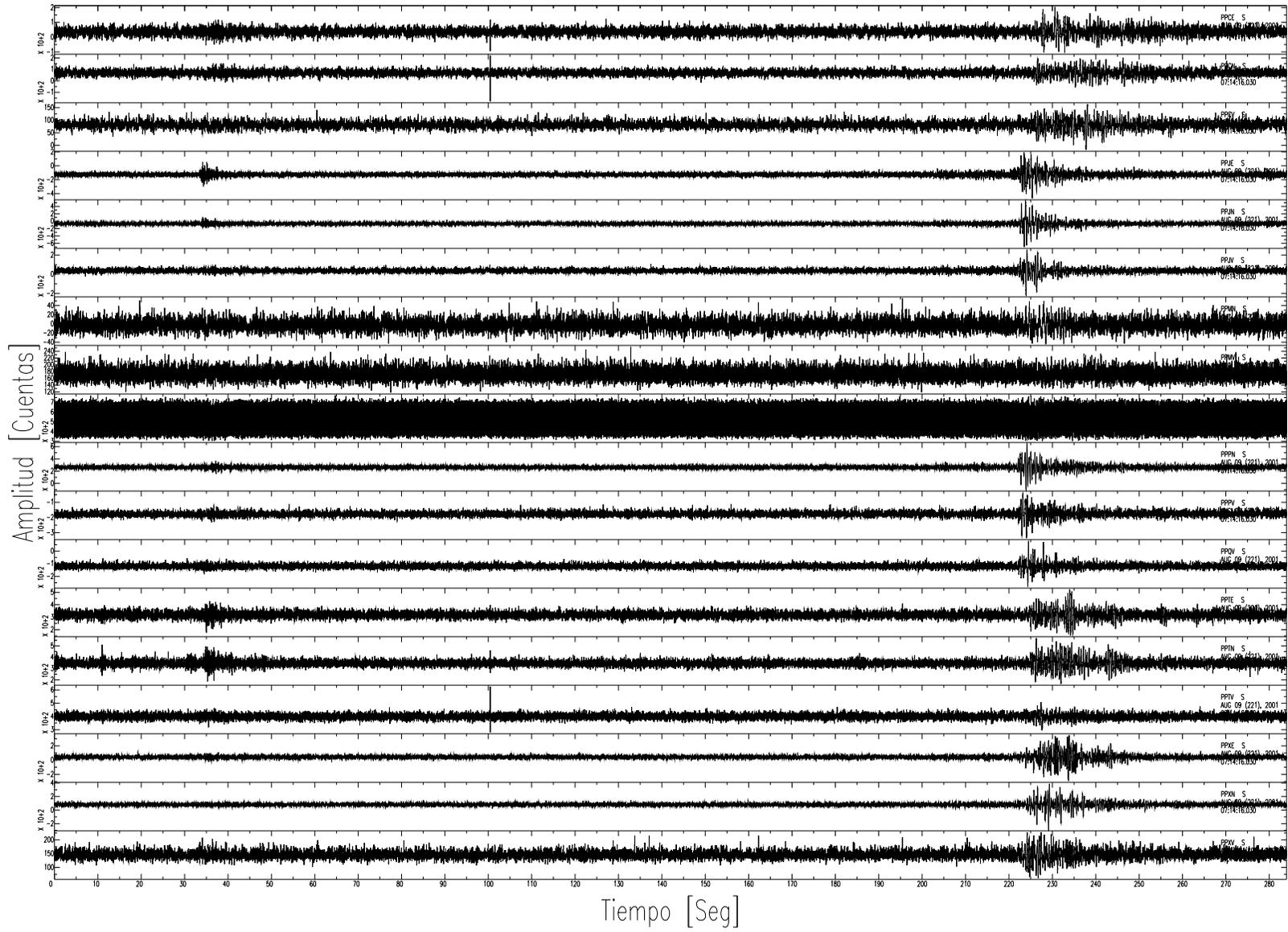


Figura 3.2: Sismogramas de todas las estaciones de la Red, 07:14:17 hora tiempo local

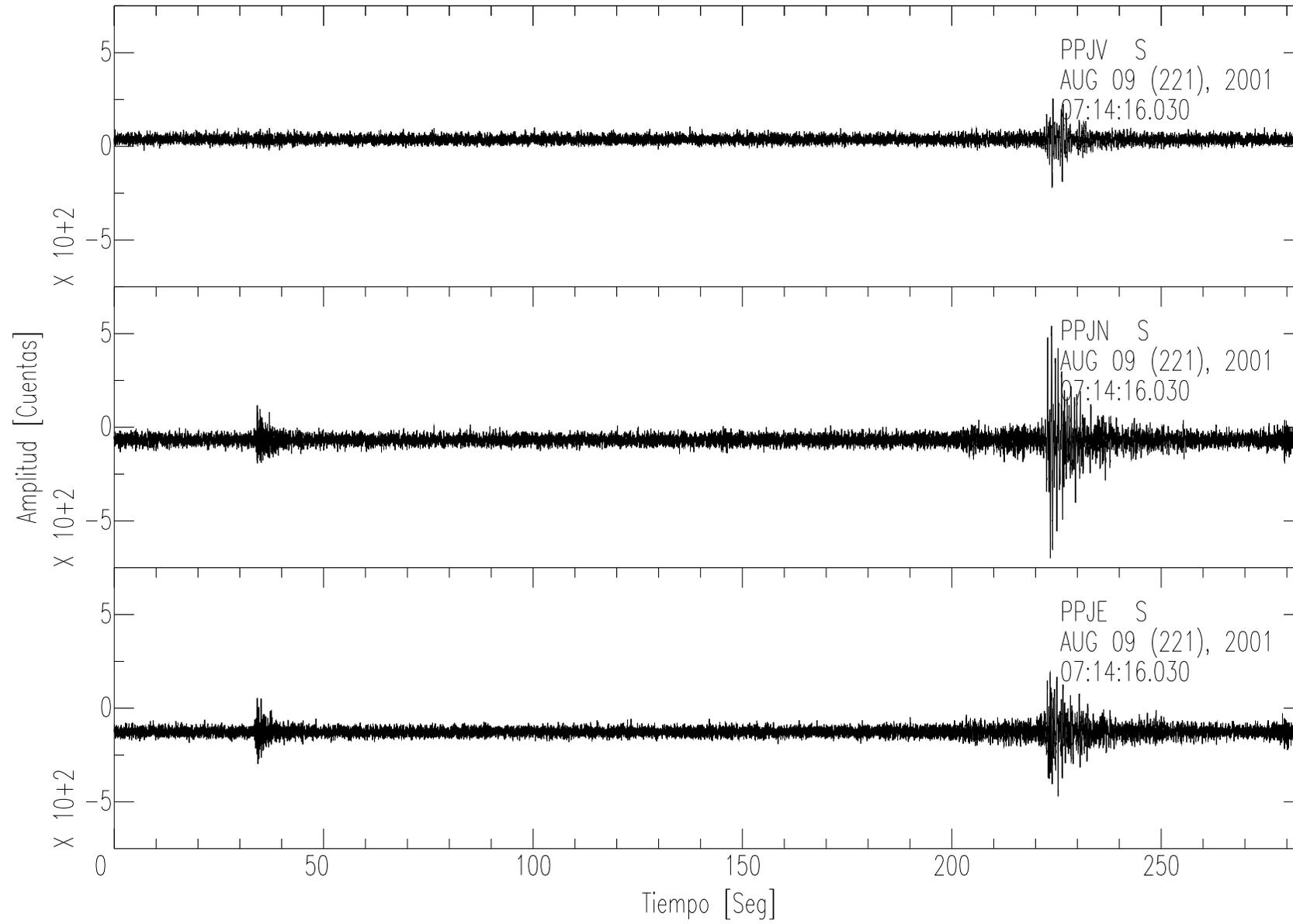


Figura 3.3: Estación PPJ 07:14:17 hora tiempo local

las 23:59:17 del 10 de agosto, y de las 00:04:17 del 15 de agosto hasta las 22:34:17 horas del 16 de agosto de 2001. Los registros del 11 al 14 de agosto no se analizaron debido a que hubo un período de quietud en la sismicidad del volcán(CENAPRED: Reportes diarios).

En este trabajo se localizaron eventos con intervalos aproximados de 1 hora, se visualizaron los sismogramas de todas las estaciones PPJ, PPX, PPT, PPC y PPP con el software SAC; se seleccionaron y localizaron 67 registros que contienen eventos con inicio y fin bien definidos; también se visualizaron los sismogramas de la estación PPM que solamente tiene las componentes vertical y Norte, debido a que la componente Este estaba saturada durante todo el tiempo que comprende a los datos analizados en este trabajo(la estación PPM es la más lejana del cráter); también fue visualizado el sismograma de la estación PPQ que solo tiene la componente vertical.

Capítulo 4

Procesamiento de los datos

Se visualizaron los sismogramas de todos los registros obtenidos los días 9 al 16 de agosto de 2001 para verificar el tipo de eventos registrados durante las dos etapas eruptivas. La mayoría de los eventos generados son del tipo LP, del cual se eligieron 67 eventos para su análisis; se consideraron primero aquellos eventos registrados en las estaciones de 3 componentes PPJ, PPX, PPT y PPC, y con una buena relación señal/ruido.

Para el análisis de los eventos se estableció un procedimiento: el primer análisis fue cualitativo, donde se contaron los eventos sísmicos registrados en intervalos de 5 minutos de las componentes de todas las estaciones; el número de eventos contra el tiempo se comparó con la curva RSAM(Fig. 4.1) obtenida a partir de la componente ESTE de la estación PPP que es la que el CENAPRED usa para el monitoreo sísmico del volcán. Segundo, se verificaron los espectros de los eventos con los del ruido registrado unos segundos antes del evento respectivo para verificar la relación señal/ruido.

El segundo análisis fue cuantitativo: Primero, se calculó la frecuencia dominante para cada evento seleccionado; finalmente se localizaron los eventos con el método de polarización de Montalbetti et. al.(1970)[17] calculando los eigenvectores de la matriz de covarianza en segmentos de 1 segundo con corrimientos eigenvectores de la matriz de covarianza en segmentos de 1 segundo con corrimientos de 0.01 segundos.

4.1. Número de eventos registrados

Como un primer análisis se realizó el conteo del número de eventos registrados en cada segmento de 285 segundos que ocurrieron los días 9, 10,15 y 16 de agosto de 2001 divididos en dos períodos que comprenden la etapa

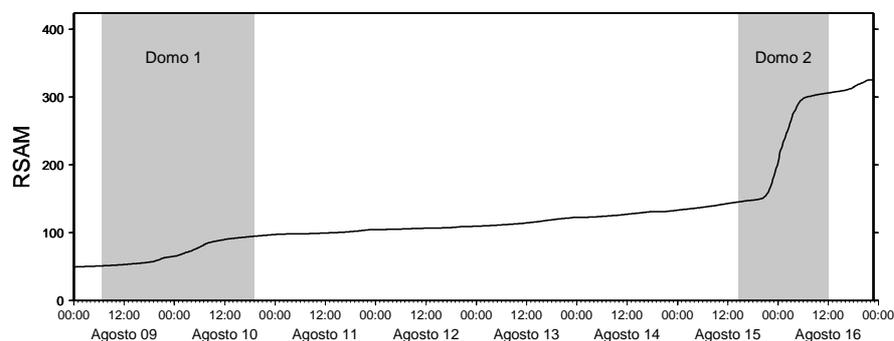


Figura 4.1: RSAM acumulativo obtenido del canal PPPE

de generación de los dos domos de lava. Los días 11 al 14 de agosto no se analizaron debido a que fue un período de quietud en la sismicidad del volcán antes de que comenzara la generación del segundo domo.

El conteo se realizó para todas las estaciones. El primer registro corresponde a las 03:09:17 horas del 9 de agosto, mientras que el último archivo del primer período corresponde a las 23:59:17 del 10 de agosto; los registros del segundo período comprenden de las 00:04:17 del 15 de agosto a las 22:34:17 horas del 16 de agosto. El número total de archivos o registros es de 359. Las gráficas del número de eventos para las tres componentes de la estación PPJ se muestran en la figura 4.2. La figura 4.2 también muestra la curva RSAM superpuesta sobre las curvas de número de eventos contra el tiempo.

En las figuras 4.2 a la 4.7 se observa que el número máximo de eventos cada 285 segundos durante el primer período del 9 de agosto es de 8 en la estación PPP; ésta es la estación más cercana al cráter del volcán, mientras que la componente Vertical de PPM registró entre 3 y 4 eventos, la componente horizontal Norte registró hasta 5 eventos alcanzando un valor de 7 como se muestra en la gráfica de la figura 4.6; por último, PPC registró hasta 6 eventos en las tres componentes; PPC es la estación más lejana al cráter (Fig. 4.5). El máximo número de eventos para el primer período de actividad se registró en todas las estaciones alrededor de las 8:30 horas del 10 de agosto de 2001.

Durante la generación del segundo domo, las figuras 4.2 a la 4.7 muestran que el número máximo de eventos fue de 12 entre las 00:09:17 y las 02:04:17 para las estaciones PPP componente Norte y PPJ componente Vertical, estas estaciones son las más cercanas al cráter. Los máximos en las estaciones PPX, PPT, PPP, PPM y PPC ordenados ascendentemente en distancia al cráter fueron de 8, 6, 5, 6 y 6 respectivamente.

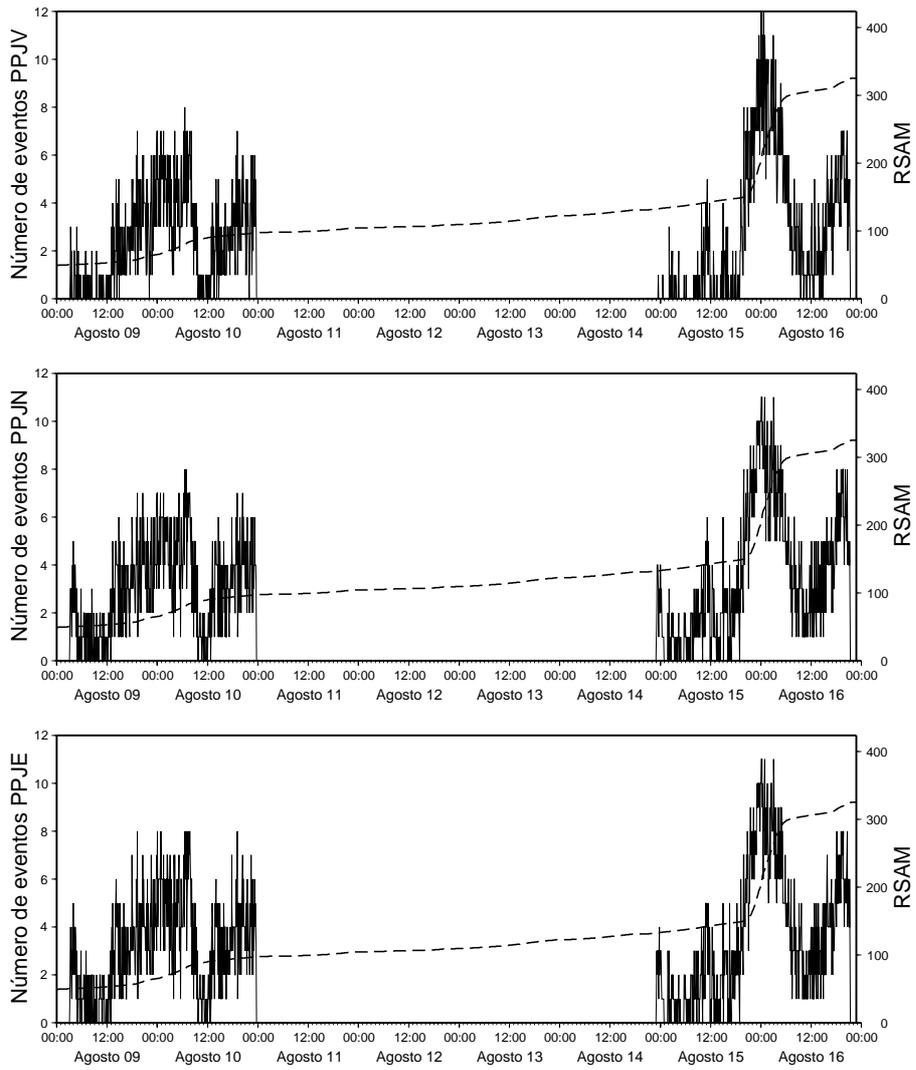


Figura 4.2: Número de eventos registrados en la estación PPJ para cada una de las componentes: Vertical, Norte y Este de arriba a abajo respectivamente.

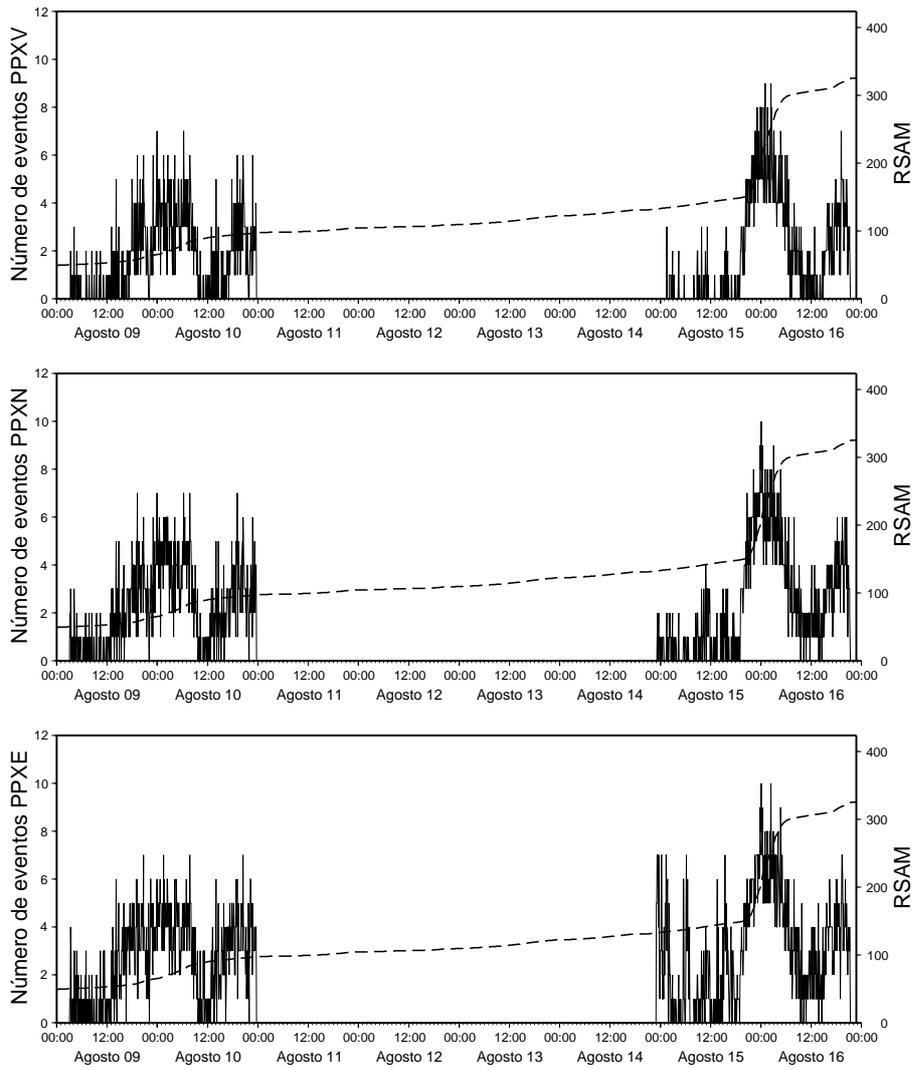


Figura 4.3: Número de eventos registrados en la estación PPX para cada una de las componentes: Vertical, Norte y Este de arriba a abajo respectivamente.

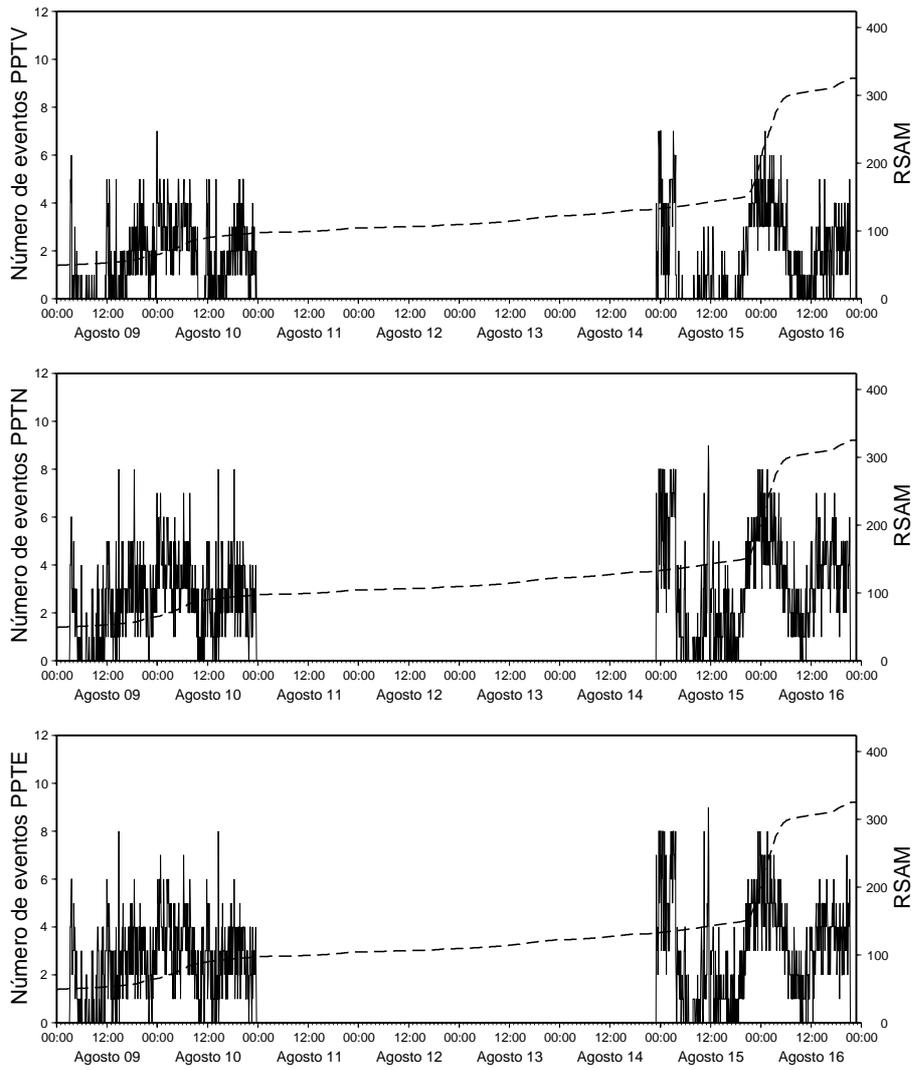


Figura 4.4: Número de eventos registrados en la estación PPT para cada una de las componentes: Vertical, Norte y Este de arriba a abajo respectivamente.

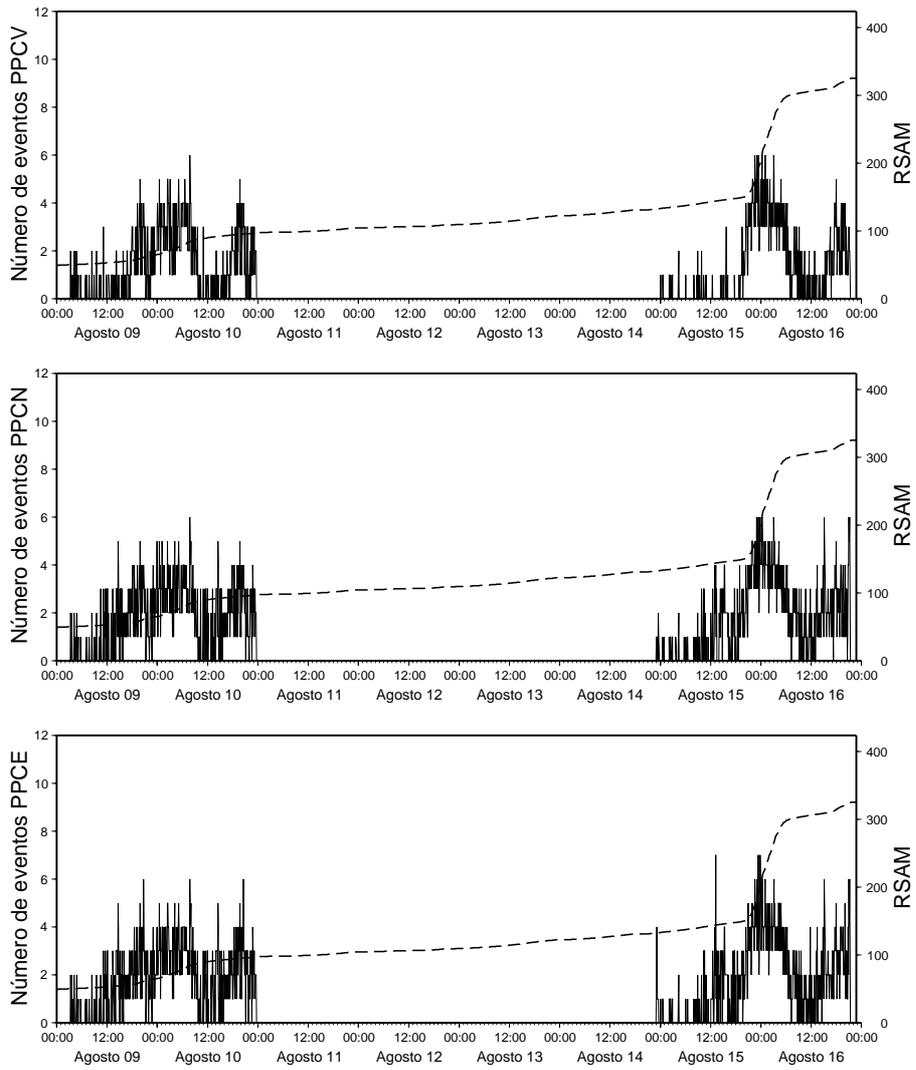


Figura 4.5: Número de eventos registrados en la estación PPC para cada una de las componentes: Vertical, Norte y Este de arriba a abajo respectivamente.

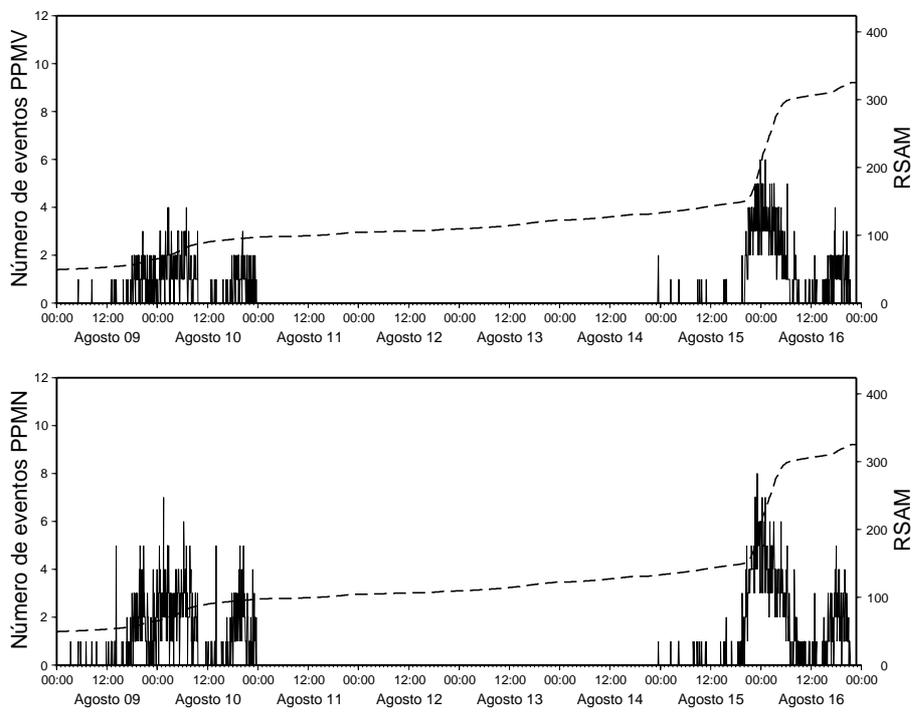


Figura 4.6: Número de eventos registrados en la estación PPM para cada una de las componentes: Vertical(arriba) y Norte(abajo) respectivamente.

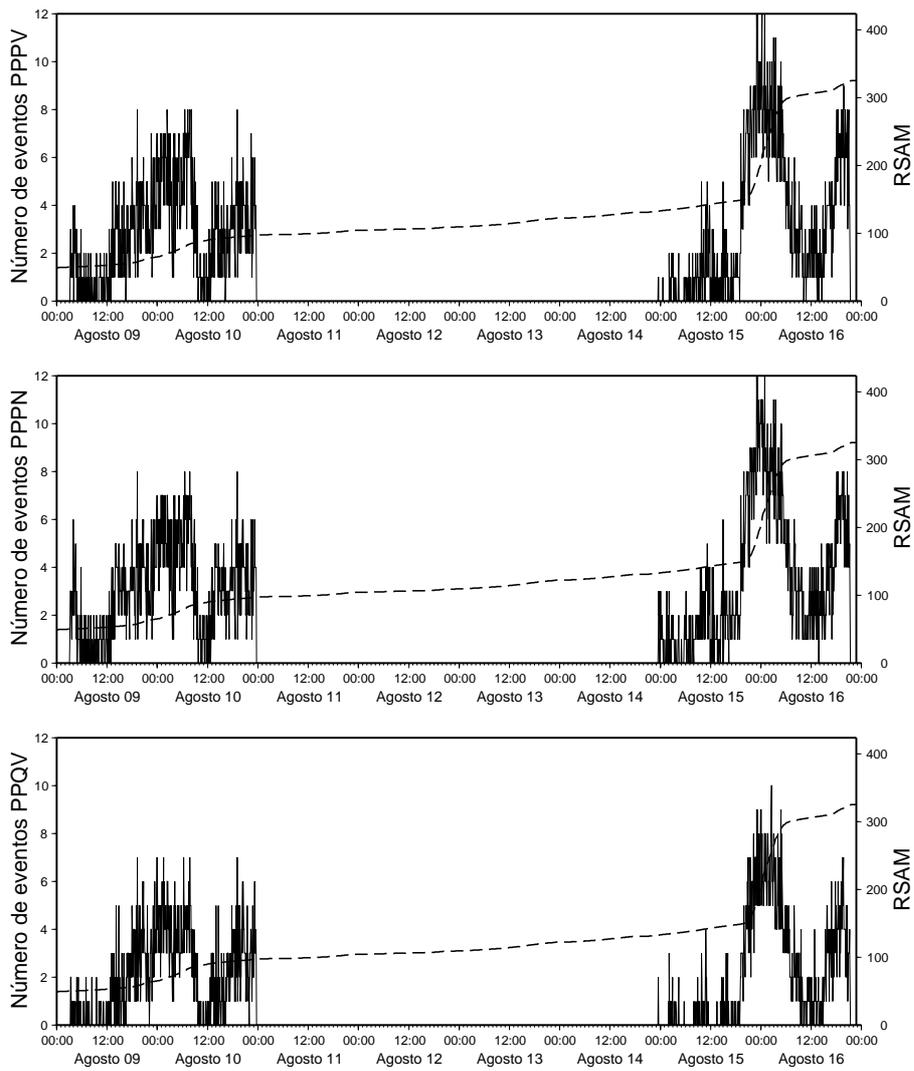


Figura 4.7: Número de eventos registrados en la estación PPP(arriba:Vertical, en medio:Norte) y PPQ(Vertical: abajo)

En las figuras 4.2 a la 4.7 se observan que todas las gráficas presentan 4 máximos a intervalos de 5 horas aproximadamente. El máximo número de eventos registrados en intervalos de una hora (entre 8 y 12) ocurrieron en las estaciones PPJ, PPP, PPT y PPX (estaciones más cercanas al cráter); mientras que las estaciones PPC y PPM (estaciones más lejanas al cráter) registraron de 4 a 6 eventos. Estos resultados sugieren que la sismicidad durante el proceso de crecimiento de los domos de lava ocurrió principalmente en la parte somera cercana al cráter.

4.2. Estimación de la frecuencia dominante

4.2.1. FFT

El primer análisis realizado a los datos sísmicos, consiste en observar su comportamiento en el dominio de la frecuencia, debido a que la energía de la fuente en la señal se manifiesta como la frecuencia dominante en el espectro de Fourier (Etter D. M, 1997)[8], con este análisis podemos obtener la frecuencia dominante de las ondas sísmicas generadas por la fuente durante la formación de los domos de lava en el cráter del volcán.

La figura 4.8 muestra el evento de interés seleccionado a partir de los registros mostrados en la figura 3.2. Para nuestro ejercicio, seleccionamos las 3 componentes de la estación PPJ; la gráfica de la figura 4.9 muestra los sismogramas de las 3 componentes de la estación PPJ.

El espectro de frecuencias del registro de la componente vertical mostrado en la figura 4.10 se muestra en la figura 4.11.

La figura 4.12 muestra los espectros de frecuencia de las tres componentes (221:07:14:17) de la estación PPJ de la figura 4.9. En el espectro de frecuencias se observan valores máximos en el rango de frecuencias de 0 a 10 Hz para las tres componentes con valores de 1.28, 1.65, 1.9, 2, 2.6, 2.9 y 7.2 Hz respectivamente. La componente Este de PPJ muestra un valor máximo en la frecuencia de 5.6 Hz aproximadamente.

Con esta metodología, se estimaron las frecuencias dominantes de 67 eventos registrados que corresponden a las dos etapas de intensa actividad sísmica y crecimiento de los domos de lava. Los eventos generados por el Popocatepetl tienen su frecuencia dominante entre 1.5 y 3.5 Hz.

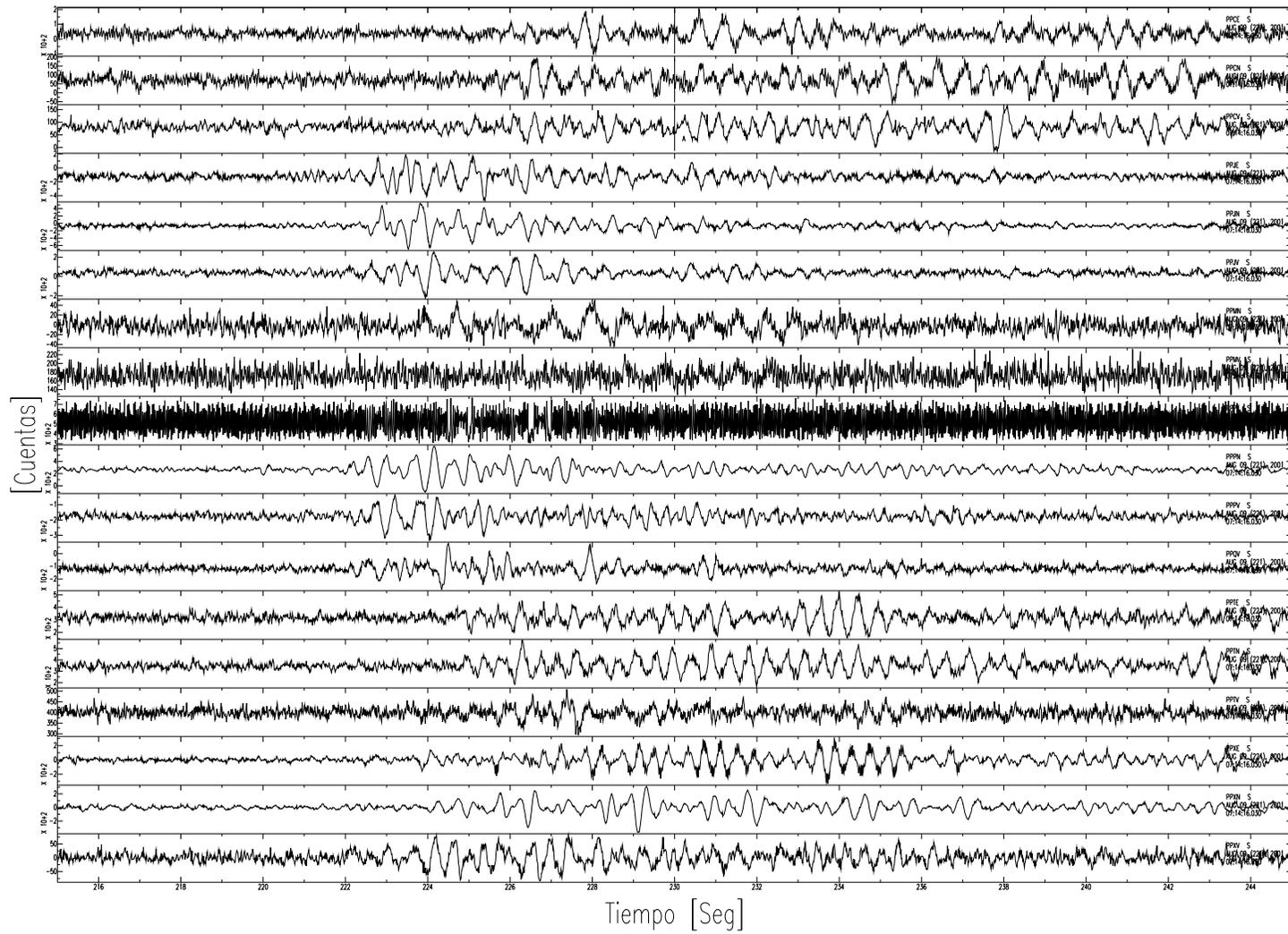


Figura 4.8: Evento seleccionado del registro 07:14:17 hora tiempo local

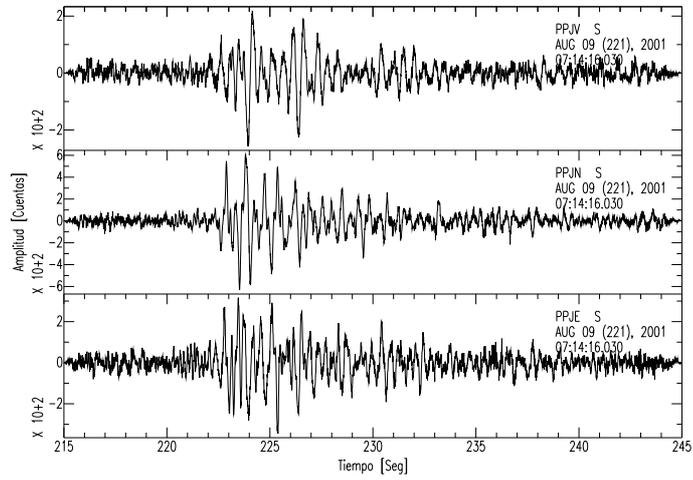


Figura 4.9: Sismogramas de la estación PPJ Vertical, Norte y Este del registro correspondiente a las 07:14:17 hora tiempo local

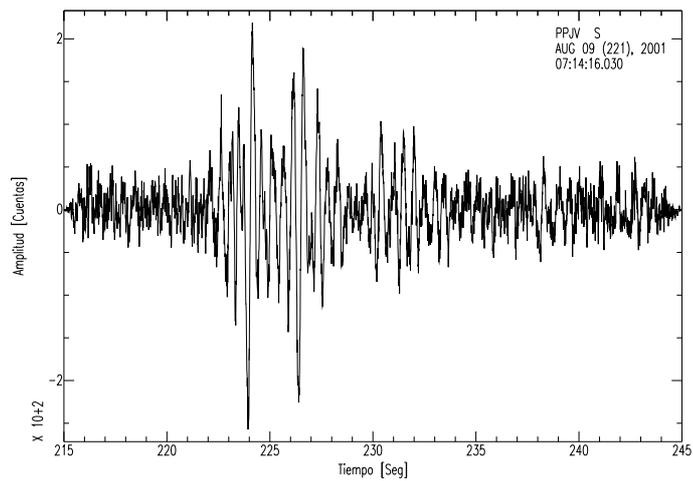


Figura 4.10: Componente Vertical de la estación PPJ 07:14:17 hora tiempo local

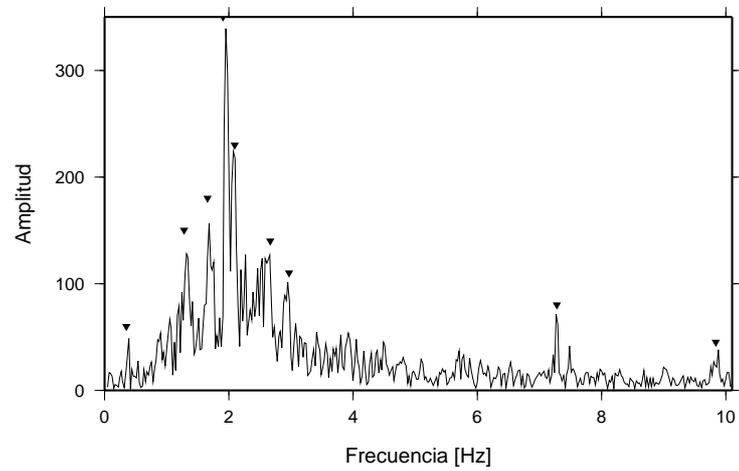


Figura 4.11: Espectro de la componente Vertical de la estación PPJ 07:14:17 hora tiempo local

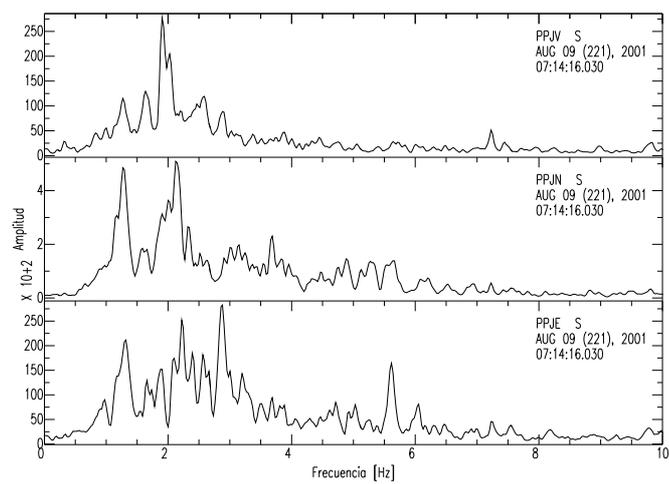


Figura 4.12: Espectros de las componentes de la estación PPJ 07:14:17 hora tiempo local

4.2.2. Relación señal-ruido

Conceptualmente es posible separar en tres grupos a los diferentes factores que intervienen en las características del movimiento del terreno para un sitio y sismo específico. Estos tres grupos son: efectos de fuente, efectos de trayecto y efectos de sitio. Cada uno de ellos contribuye de manera particular al movimiento observado (Castillo (2000)[1]).

En el primer grupo se incluyen factores relacionados con el origen del sismo. Estos factores incluyen al tipo de falla geológica que le dio origen y a parámetros tales como el área de la falla, la magnitud del desplazamiento relativo sobre ella, su dirección, velocidad, etc.

Las ondas sísmicas generadas a partir de la fuente viajan a través del subsuelo. Durante este trayecto van perdiendo energía debido a que los materiales no son perfectamente elásticos y se presentan deformaciones inelásticas presentándose la atenuación de las ondas sísmicas con la distancia y el tiempo. También se presenta la pérdida de energía por fricciones internas en las rocas. Los mecanismos de fricción interna dependen directamente de las características atómicas y moleculares de los minerales que conforman las rocas. A esta atenuación se denomina atenuación intrínseca. A este conjunto de fenómenos se les denominan efectos de trayecto.

El último grupo son los efectos de sitio, los cuales están relacionados con las características geológicas locales del sitio de registro. Tanto de las propiedades físicas de las rocas que conforman el subsuelo como la estructura geológica influyen en las características de la señal sísmica. En ciertos casos los efectos de sitio toman un papel determinante en las características del movimiento del terreno.

Para establecer el rango de frecuencias a analizar, se buscó que la relación señal/ruido sea buena y que existan amplitudes máximas. Para obtener la relación de amplitudes máximas entre la señal y el ruido, se compararon sus respectivos espectros de amplitudes de Fourier entre la señal y el ruido, tomando una ventana de 8 segundos para cada registro.

En las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 se observa que la relación de amplitud entre la señal y el ruido es buena en el rango de 0.8 a 6 Hz; este rango de frecuencias se presentó en todos los eventos. La obtención de este rango de frecuencias no considera los efectos de sitio.

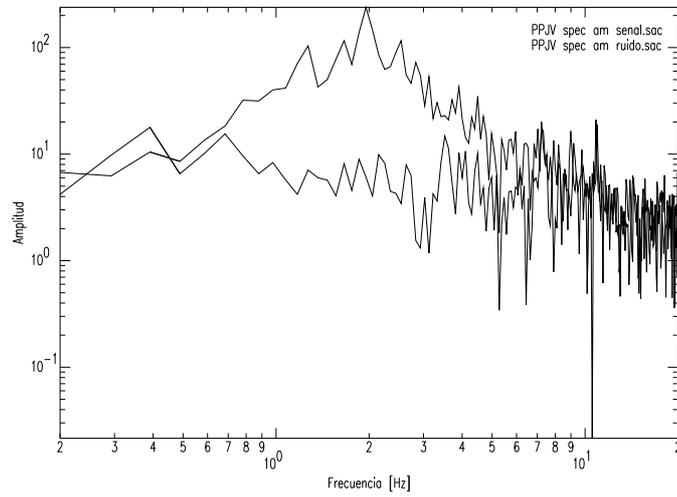


Figura 4.13: Espectros de amplitudes de la componente Vertical de la señal y ruido respectivamente (221:07:14:17).

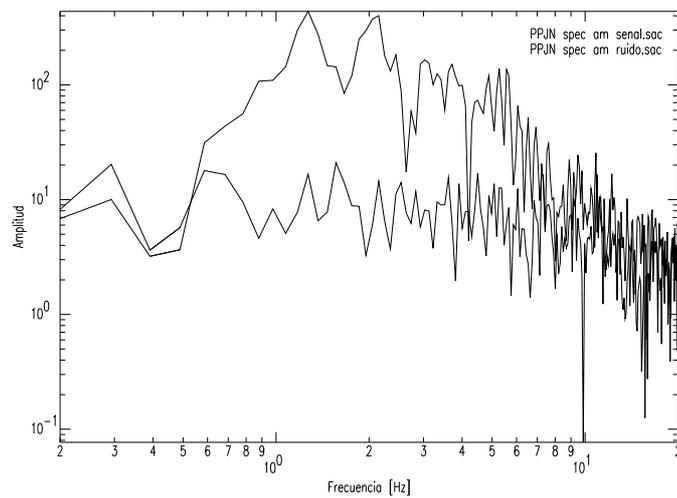


Figura 4.14: Espectros de amplitudes de la componente Norte de la señal y ruido respectivamente (221:07:14:17).

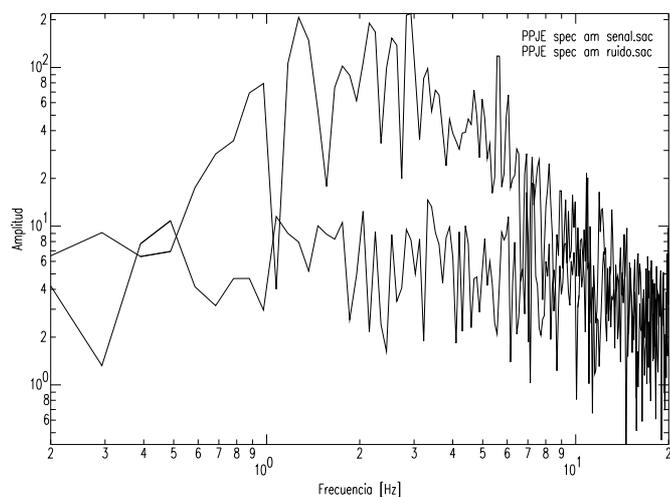


Figura 4.15: Espectros de amplitudes de la componente Este de la señal y ruido respectivamente (221:07:14:17)

4.2.3. Efectos de sitio

Una técnica para evaluar el efecto de sitio es el método de Nakamura(1989)[18], su técnica se basa en calcular el cociente espectral entre las componentes horizontales y la componente vertical. En este trabajo se estimaron las razones espectrales con el método de Nakamura en las estaciones PPJ, PPX, PPT y PPC respectivamente con el siguiente procedimiento:

1. Selección de 67 eventos.
2. Selección de una ventana de 10 segundos que contiene al evento.
3. Taper coseno 10 por ciento.
4. Transformada de Fourier de las tres componentes.
5. Suavizamiento del espectro de amplitudes pasando 2 veces una ventana de Hanning.
6. División entre los espectros componentes Norte/Vertical
7. División entre los espectros componentes Este/Vertical
8. Promedio de las 67 razones espectrales obtenidas N/V y E/V respectivamente.

Los resultados se muestran en las figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 y 4.23.

VOLCAN POPOCATEPETL ESTACION PPJ
METODO DE NAKAMURA-COMPONENTES N-V

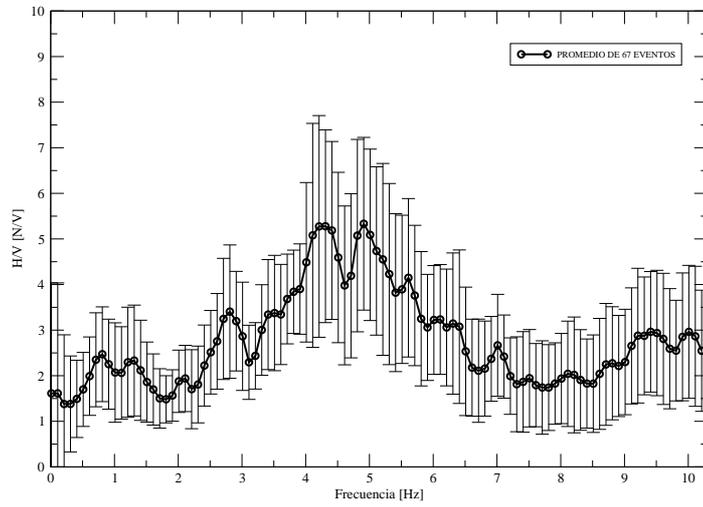


Figura 4.16: Razón espectral Norte/Vertical en la estación PPJ

VOLCAN POPOCATEPETL ESTACION PPJ
METODO DE NAKAMURA COMPONENTES E-V

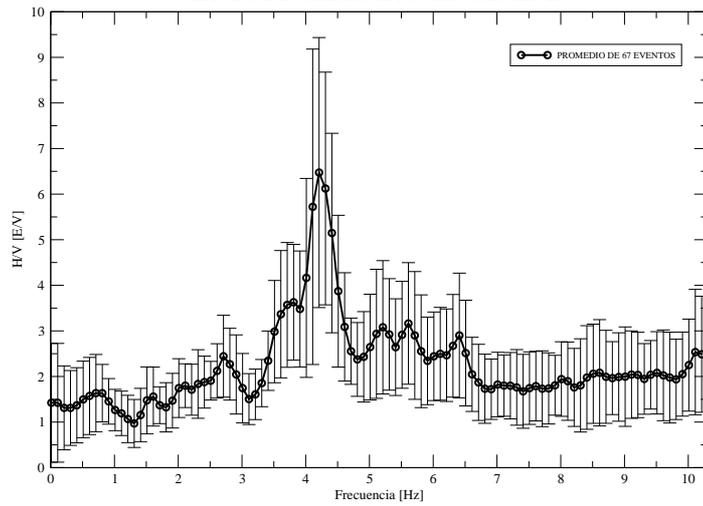


Figura 4.17: Razón espectral Este/Vertical en la estación PPJ

VOLCAN POPOCATEPETL ESTACION PPX
METODO DE NAKAMURA COMPONENTES N-V

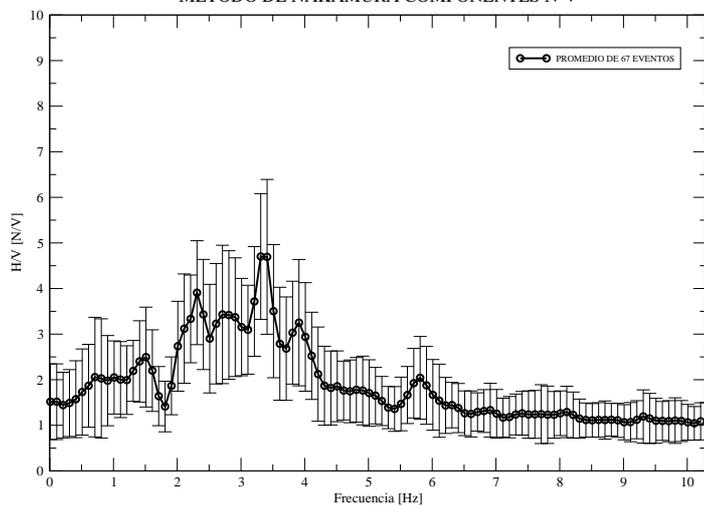


Figura 4.18: Razón espectral Norte/Vertical en la estación PPX

VOLCAN POPOCATEPETL ESTACION PPX
METODO DE NAKAMURA COMPONENTES E-V

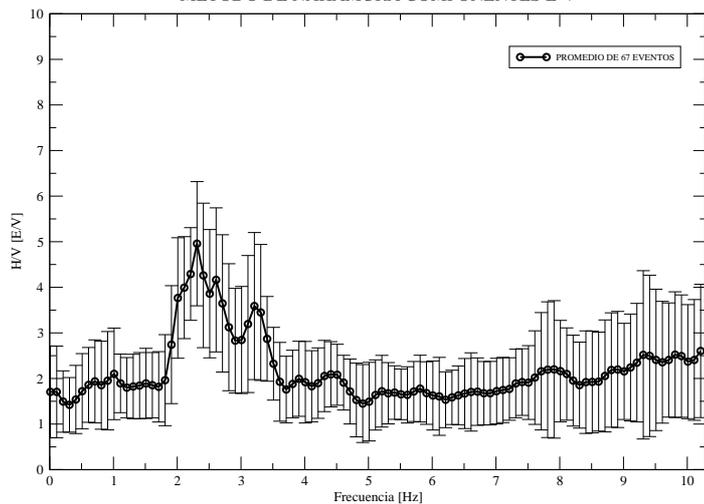


Figura 4.19: Razón espectral Este/Vertical en la estación PPX

VOLCAN POPOCATEPETL ESTACION PPT
METODO DE NAKAMURA COMPONENTES N-V

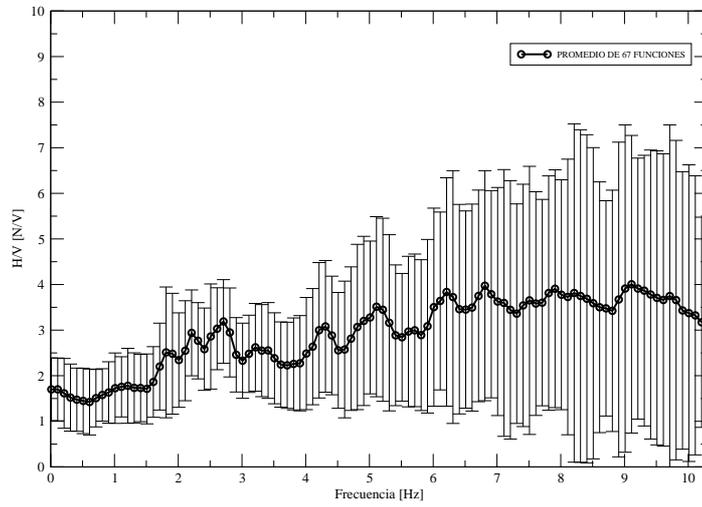


Figura 4.20: Razón espectral Norte/Vertical en la estación PPT

VOLCAN POPOCATEPETL ESTACION PPT
METODO DE NAKAMURA COMPONENTES E-V

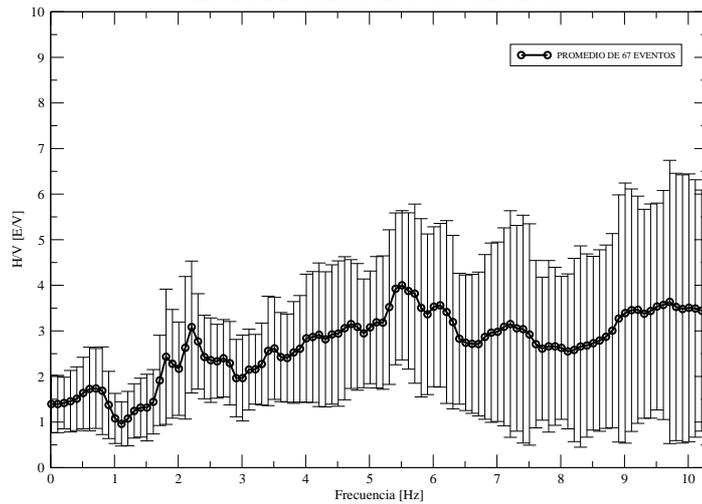


Figura 4.21: Razón espectral Este/Vertical en la estación PPT

VOLCAN POPOCATEPETL ESTACION PPC
METODO DE NAKAMURA COMPONENTES N-V

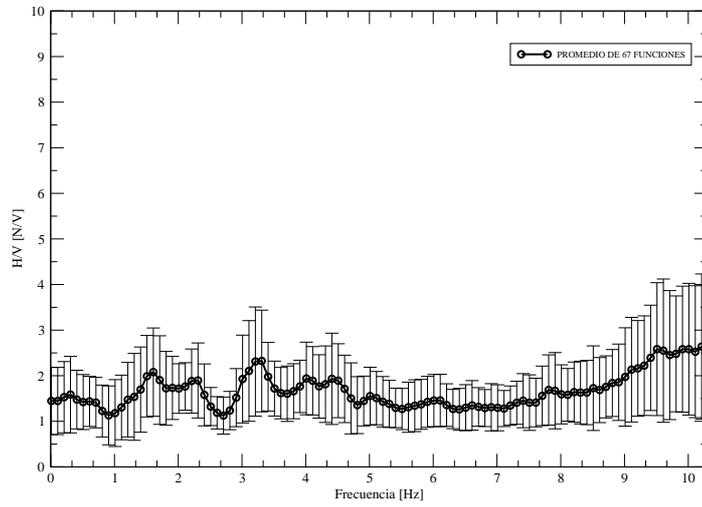


Figura 4.22: Razón espectral Norte/Vertical en la estación PPC

VOLCAN POPOCATEPETL ESTACION PPC
METODO DE NAKAMURA COMPONENTES N-V

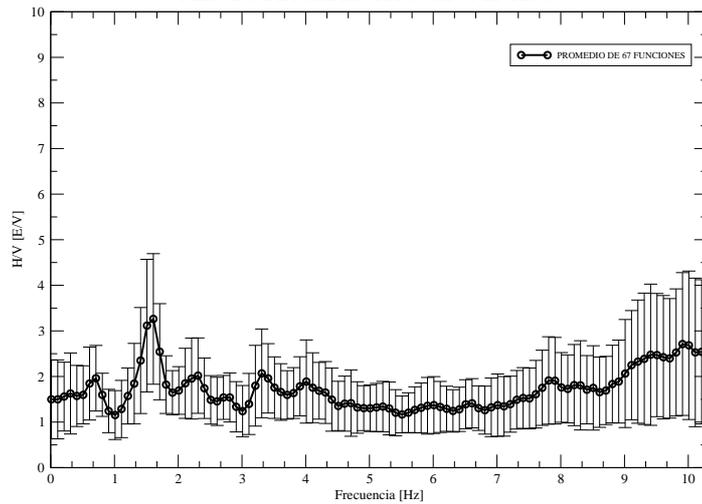


Figura 4.23: Razón espectral Este/Vertical en la estación PPC

4.3. Cálculo de los parámetros de polarización de las ondas sísmicas

Para la localización de los eventos generados por el volcán, los parámetros de polarización acimut, inclinación, linearidad y coeficientes de correlación fueron estimados a partir de sismogramas filtrados en la frecuencia dominante con un pasa-banda estrecho de 0.5 Hertz de ancho de banda. Los parámetros de polarización se estimaron para cada una de las estaciones de tres componentes; el cruce de las líneas rectas proyectadas a partir de los acimutes y ángulos de incidencia e inclinación nos indican la localización de la fuente de los eventos registrados en la red sismológica. La zona de intersección es un área de incertidumbre debido al ruido aún presente en las estaciones: localización de las estaciones, ruido de fondo y al efecto de la estructura debajo de cada estación.

Para estimar los parámetros de polarización del movimiento de la partícula, se realizó un programa en lenguaje FORTRAN 77 (Ver apéndice). Los resultados que se obtienen del programa son acimut, ángulo de incidencia, ángulo de inclinación, linearidad y coeficientes de correlación en función del tiempo para cada estación.

4.3.1. Programa COVMATMEX

El programa calcula la matriz de covarianza de la ecuación 2.6, realiza la diagonalización y calcula los eigenvalores y sus respectivos eigenvectores usando como datos de entrada tres series de tiempo que representan las componentes Vertical, Norte y Este. Para checar que el programa funciona correctamente, se realizaron pruebas con funciones en los planos X y Y que representan las componentes horizontales Este y Norte respectivamente con movimientos de partículas simples. La componente Vertical es cero en función del tiempo. El caso más simple es el movimiento de la partícula representado por una línea recta en dirección del eje Y (Figura 4.24). Las series de muestras contienen 100 valores que representan 1 segundo de tiempo, la amplitud mínima y máxima de la componente Y (Norte) son -0.5 y 0.49 respectivamente, mientras que las amplitudes de la componente X son cero.

La matriz de covarianza de entrada es:

$$V = \begin{bmatrix} 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.083325 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

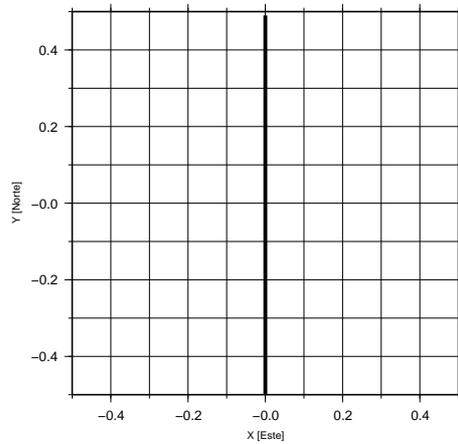


Figura 4.24: Movimiento de partícula en dirección N-S

los eigenvalores estimados son:

$$eigenvalores = \begin{bmatrix} 0.0833250061 \\ 0.0000000000 \\ 0.0000000000 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

el máximo eigenvalor del vector 4.2 es 0.083 con un acimut de 180 grados medidos a partir del Norte y un ángulo de inclinación de 90 grados a partir del eje Y positivo. Los coeficientes de correlación resultantes entre las series de tiempo de planos EN, NV y EV que el programa también reporta es un valor NaN (Not a number) respectivamente; por último la linealidad es 1; el coeficiente de correlación es una medida de similitud o parecido entre dos series de tiempo, NaN indica una división entre cero lo que demuestra que no hay similitud entre las series de tiempo registrada por las tres componentes. El valor 0.083 de la matriz 4.1 indica la covarianza de la serie de tiempo de la componente Norte (Y). El ángulo de 180 grados de acimut indica la dirección de la distribución, pero no el sentido. Los coeficientes de correlación que el programa calcula nos indica que las amplitudes se encuentran sobre una componente, pero no indican cual de las tres es la que tiene muestras no cero.

Una segunda prueba fue realizada con la misma distribución lineal, adicionando un 5 cinco por ciento de ruido aleatorio de la componente Y (Norte) a la componente X (Este) como se muestra en la figura 4.25. La matriz de covarianza estimada es:

$$V = \begin{bmatrix} 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.083325 & 0.000258 \\ 0.000000 & 0.000258 & 0.000838 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

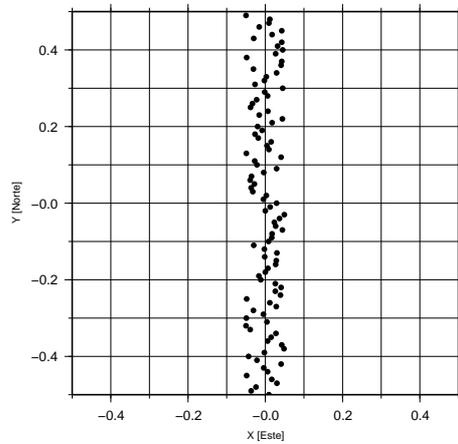


Figura 4.25: Movimiento de partícula en dirección N-S

los eigenvalores estimados son:

$$eigenvalores = \begin{bmatrix} 0.083325810700 \\ 0.000836980471 \\ 0.000000000000 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

el máximo eigenvalor del vector 4.4 es 0.083 con un acimut de 0.17 grados medidos a partir del Norte y un ángulo de inclinación de 89.8 grados a partir del eje Z positivo. Los coeficientes de correlación resultantes entre las series de tiempo de planos EN, NV y EV que el programa reporta son 0.00095, NaN y NaN respectivamente; por último la linealidad es 0.981. Los valores de la matriz 4.4 nos indica que está comparando las componentes Este (X) con Norte (Y) El ángulo ahora es de 179 grados de acimut e indica que la nueva dirección de la distribución, no varía significativamente del resultado del ejemplo anterior. El coeficiente de correlación estimado también es pequeño, e indica que las muestras no cero se encuentran en la serie de tiempo en la componente Norte (Y).

Un tercer ejercicio fue realizado con una distribución lineal con 45 grados de acimut y adicionando un 5 cinco por ciento de ruido aleatorio a las componentes X (Este) y Y (Norte) como se muestra en la figura 4.26. La matriz de covarianza estimada es:

$$V = \begin{bmatrix} 0.000000 & 0.000000 & 0.083568 \\ 0.000000 & 0.086329 & 0.082423 \\ 0.000000 & 0.083568 & 0.000838 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

los eigenvalores estimados son:

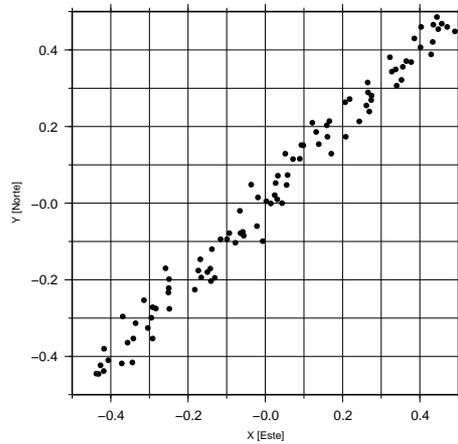


Figura 4.26: Movimiento de partícula con acimut de 45 grados

$$eigenvalores = \begin{bmatrix} 0.167966232 \\ 0.000785216 \\ 0.000000000 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

el máximo eigenvalor del vector 4.6 es 0.16 con un acimut de 44.33 grados medidos a partir del Norte y un ángulo de inclinación de 90 grados a partir del eje Z positivo. Los coeficientes de correlación resultantes entre las series de tiempo de planos EN, NV y EV que el programa reporta son 0.98, NaN y NaN respectivamente; por último la linealidad es 0.99. Los valores de la matriz 4.6 nos indica que está comparando las componentes Este (X) con Norte (Y). El coeficiente de correlación estimado también es cercano a 1, e indica que los registros de las componentes Este y Norte son muy parecidos, la presencia de 5 por ciento de ruido aleatorio produce una incertidumbre numérica en la linealidad de $1-0.995=0.0046$.

A continuación se muestran los parámetros de polarización estimados usando los datos del volcán Popocatepetl con los registros de las componentes horizontales de la estación PPJ (evento 221:16:54:17, ver figura 4.27). Primero se estimó la frecuencia dominante promediando los espectros de amplitudes de todas las estaciones (La figura 4.28 muestra los registros de todas las estaciones). La gráfica del espectro promedio de la figura 4.29 muestra un máximo a 1.75 Hz aproximadamente.

Siguiendo con el análisis de las componentes horizontales de la estación PPJ, se filtraron los registros de las tres componentes con un filtro pasabandas Butterworth con 4 polos centrado en 1.75 Hz con un ancho de banda de 0.5 Hz. Los tres canales filtrados son los datos de entrada al programa

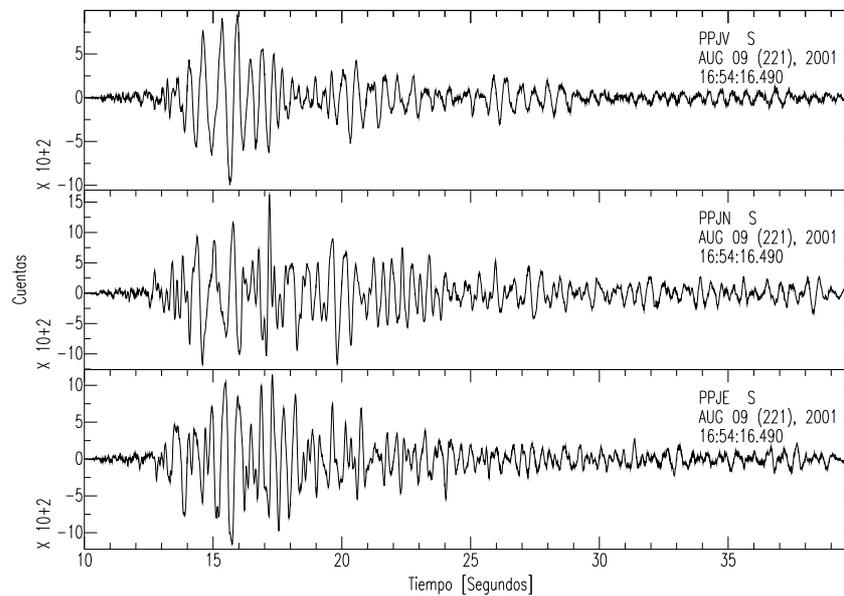


Figura 4.27: Sismogramas de las tres componentes del evento 221:16:54:17 de la estación PPJ.

COVMATMEX.

El programa COVMATMEX fue ejecutado en ventanas de tiempo de 1 segundo con corrimientos de 1 muestra (10 milisegundos). Los resultados se muestran en la figura 4.30.

Por último, el diagrama de roseta de la figura 4.30 fue generado con la linealidad como radio de la circunferencia (que muestran valores entre 0.8 y 0.9) y los acimutes de la zona sombreada, los valores altos de linealidad demuestran la presencia de ondas P con una distribución de los acimutes alrededor de 145 grados.

Con el fin de localizar el evento, se realizó el mismo procedimiento con las componentes horizontales de las estaciones PPX, PPT, PPC y PPP (PPP es la estación de banda ancha); los diagramas de roseta obtenidos se muestran en el plano del volcán en la figura ???. Los diagramas de roseta muestran direcciones preferenciales para cada estación; si se proyecta una línea recta a partir de cada estación siguiendo la dirección preferencial respectiva, las líneas rectas se cruzan en un área donde el centro se ubica en las coordenadas geográficas -98.6 grados de longitud y 19.0 grados de latitud con barras de error de 900 m en la dirección E-W y 1.5 km en la dirección N-S. Para confirmar los resultados, se generaron los movimientos de las partículas con las componentes horizontales de cada estación respectivamente (Figura ???).

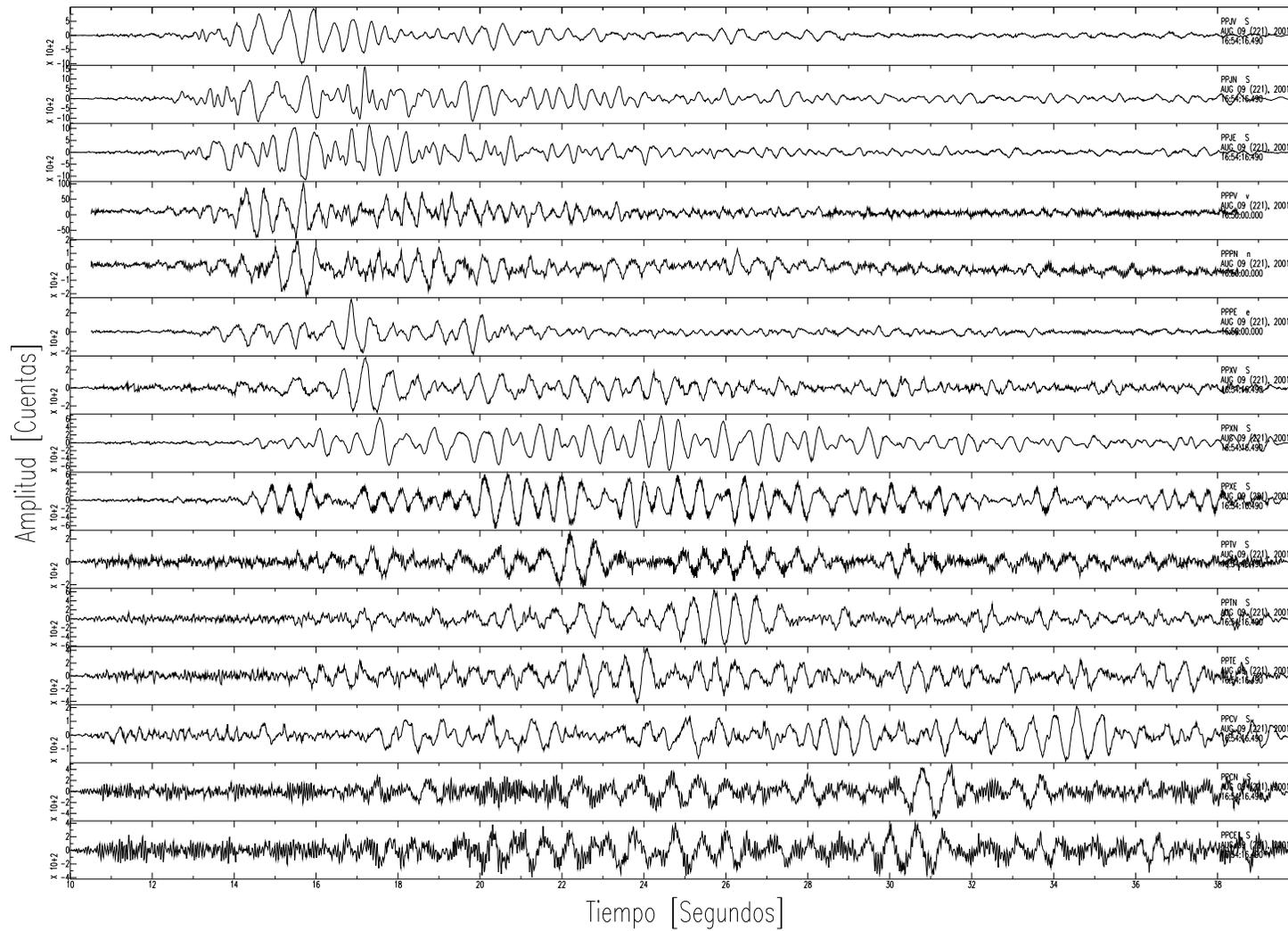


Figura 4.28: Sismogramas de las estaciones PPJ, PPX, PPT y PPC con el evento 221:16:54:17.

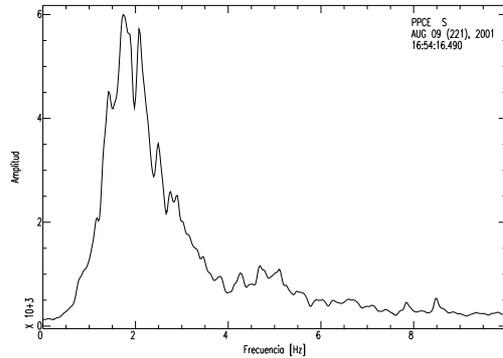


Figura 4.29: Promedio de los espectros de los registros de todas las estaciones del evento 221:16:54:17

La figura 4.33 muestra un perfil N-S con rosetas ahora obtenidas a partir de los parámetros linealidad versus el ángulo medido a partir del eje vertical positivo en sentido de las manecillas del reloj; mientras que la figura 4.34 muestra el movimiento de la partícula en cada estación; ambas figuras muestran el evento localizado. Las líneas rectas que pasan por las distribuciones más densas de las rosetas y con linealidades altas se trazaron solamente en las estaciones PPT y PPC(Figura 4.33) debido a que las rosetas de los planos verticales están proyectados en perfiles N-S y EW francos respectivamente; para tener mejores resultados, se generaron los movimientos de partículas para confirmar las coordenadas del centro del área de localización.

La figura 4.35 muestra un perfil E-W con rosetas ahora obtenidas a partir de los parámetros linealidad versus el ángulo medido a partir del eje vertical positivo en sentido de las manecillas del reloj; mientras que la figura 4.36 se muestra el movimiento de la partícula en cada estación; ambas figuras muestran también el evento localizado. Las líneas rectas que pasan por las distribuciones más densas de las rosetas y con linealidades altas se trazaron solamente en las estaciones PPX, PPT y PPC(Figura 4.34) los movimientos de partículas confirman las coordenadas del centro del área de localización.

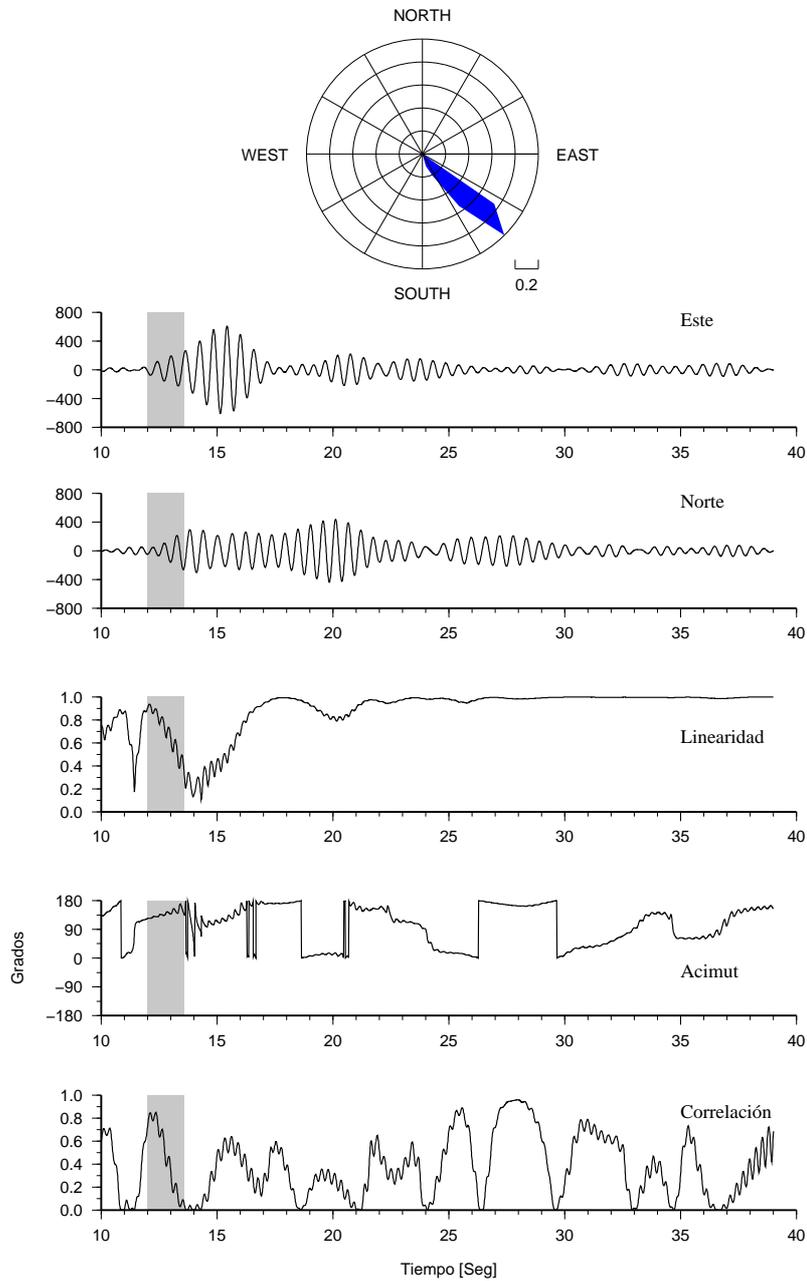


Figura 4.30: Parámetros de polarización obtenidos a partir de las componentes horizontales PPJE vs PPJN de la estación PPJ(evento 221:16:54:17): Componentes Norte y Este respectivamente filtrados con un filtro pasa-banda de 1.50-2.00 Hz, ángulo medido a partir del norte(acimut), linealidad del movimiento de la partícula y correlación entre los sismogramas. El diagrama de roseta se geneó con el acimut vs la linealidad de la zona sombreada.

VOLCAN POPOCATEPETL 221165417 BP 1.50-2.00 Hz

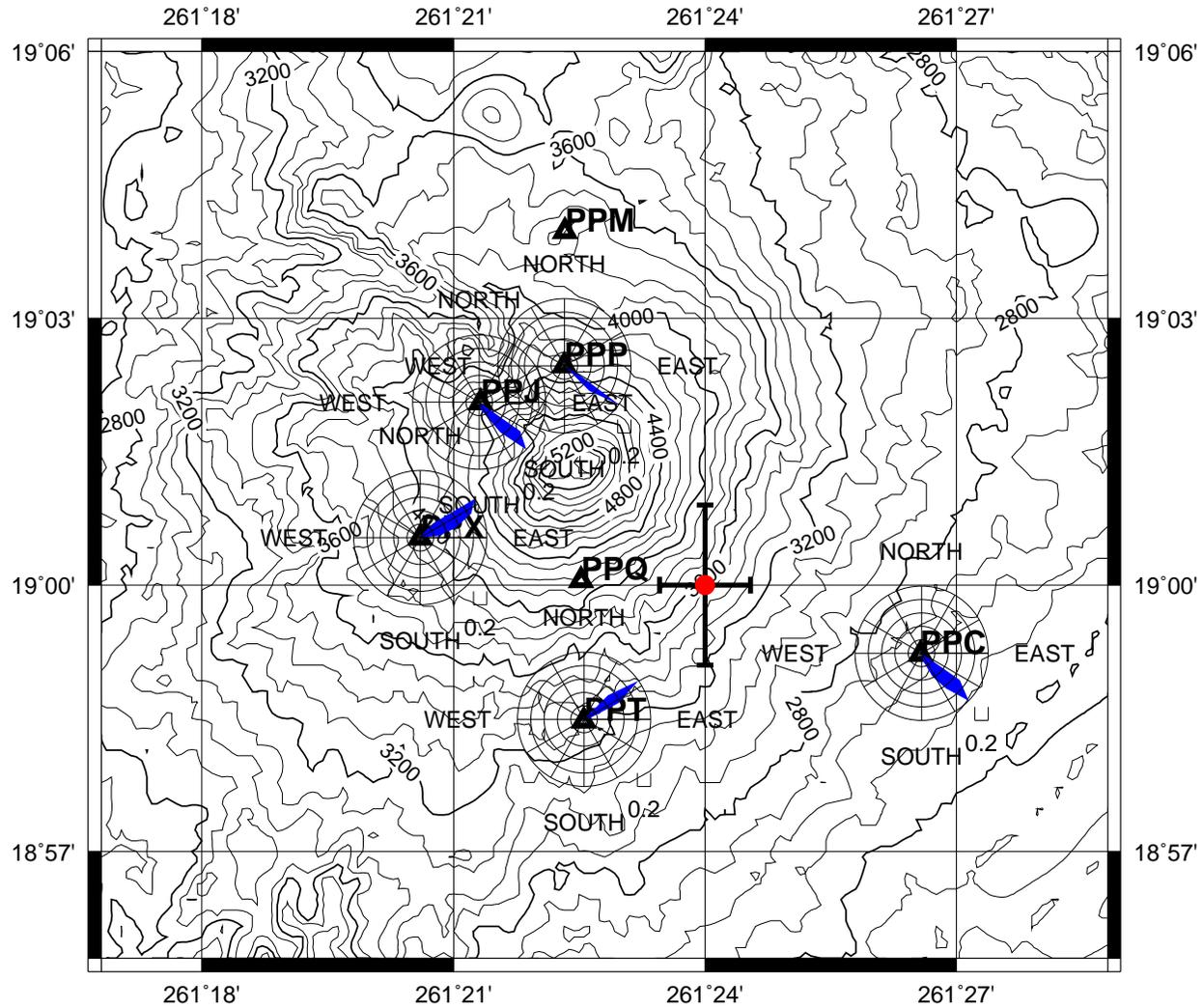


Figura 4.31: Evento 221:16:54:17. Plano topográfico del Popocatepetl con las rosetas de polarización: linearidad(radio) y ángulo medido a partir del norte(acimut).

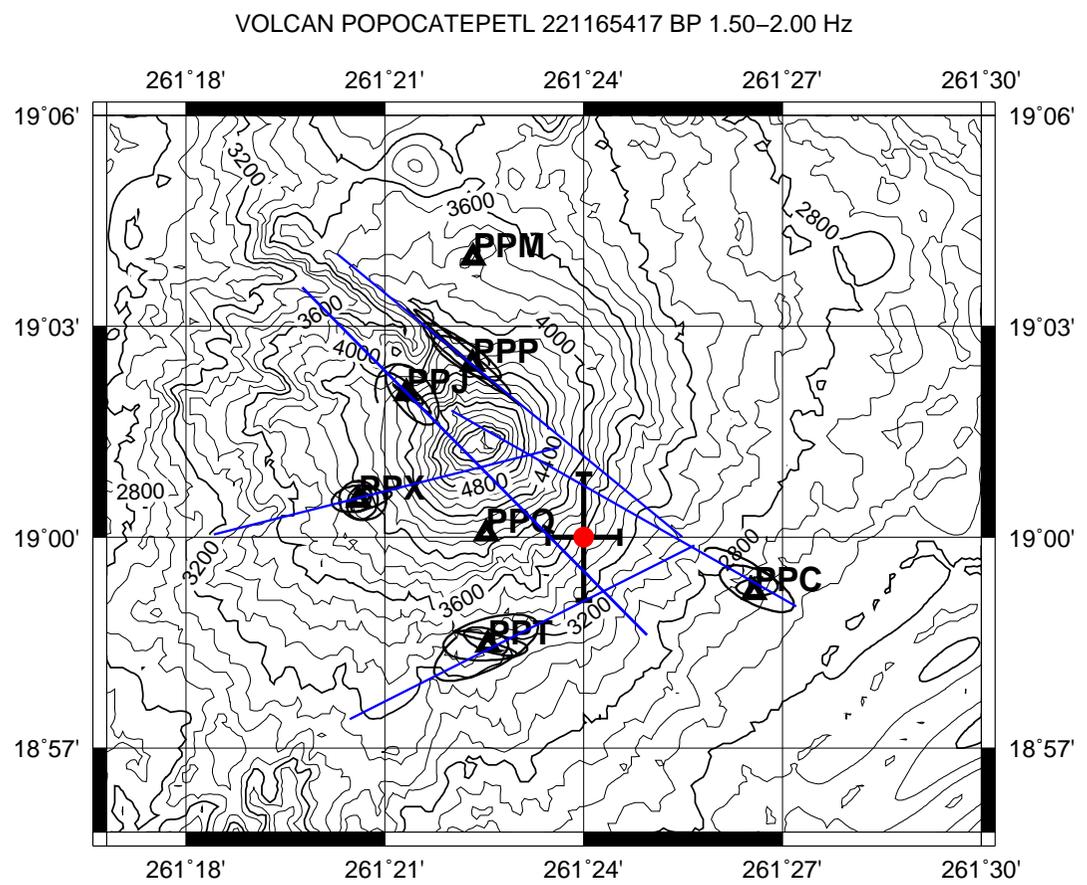


Figura 4.32: Evento 221:16:54:17. Plano topográfico del Popocatépetl con los diagramas de movimiento de partículas con el evento 221:16:54:17 localizado.

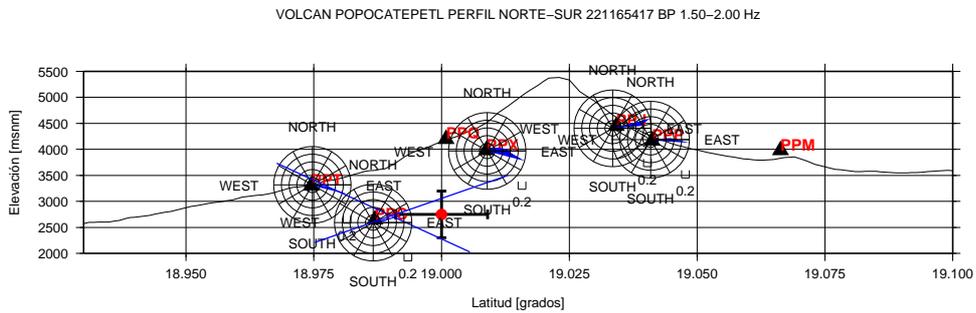


Figura 4.33: Perfil topográfico N-S del Popocatépetl con los parámetros de polarización estimados linealidad(radio) y ángulo medido a partir del eje vertical positivo en sentido de las manecillas del reloj.

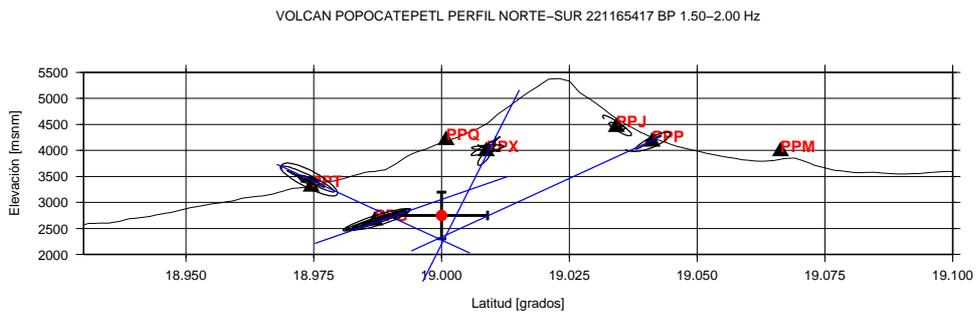


Figura 4.34: Perfil topográfico N-S del Popocatépetl con el movimiento de la partícula de cada estación.

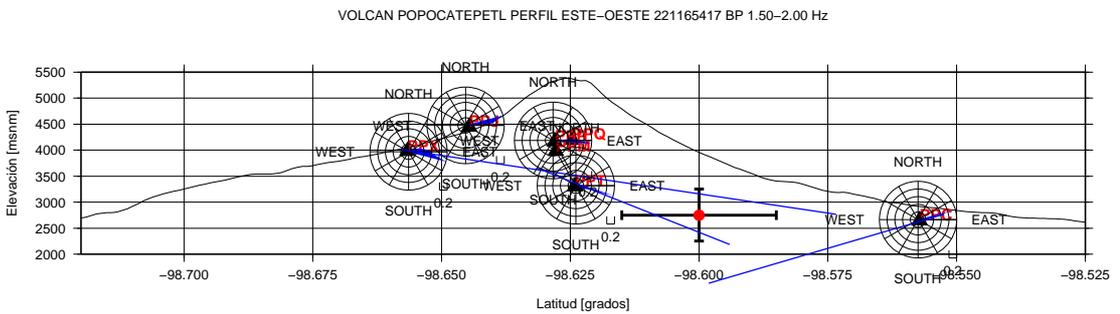


Figura 4.35: Perfil topográfico E-W del Popocatépetl con los parámetros de polarización estimados linealidad(radio) y ángulo medido a partir del eje vertical positivo en sentido de las manecillas del reloj.

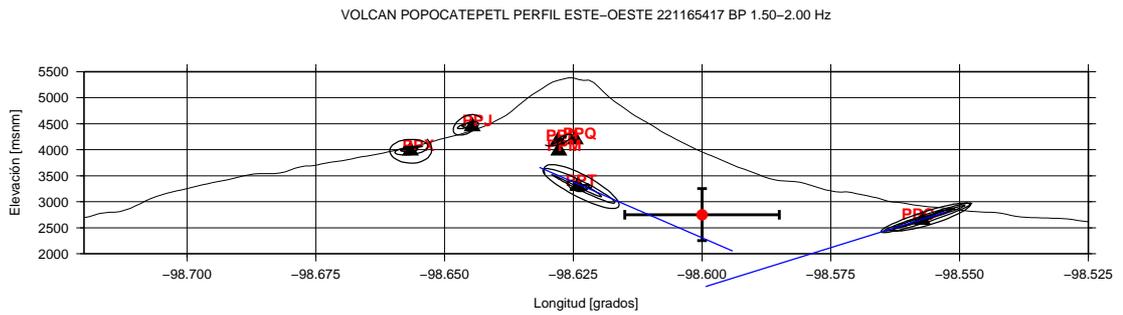


Figura 4.36: Perfil topográfico E-W del Popocatépetl con el movimiento de la partícula de cada estación.

Capítulo 5

Resultados

Con la metodología de polarización, se seleccionaron y localizaron 67 eventos sísmicos registrados durante el crecimiento de dos domos de lava que corresponden a los días 9, 10, 15 y 16 de agosto de 2001. El criterio de selección de los registros localizados fue mantener aproximadamente constante el intervalo de tiempo de 1 hora entre cada evento. La gráfica RSAM de la figura 4.1 muestra dos pendientes fuertes que corresponden a las dos etapas de creación de los domos y coinciden con registros saturados debido a la intensa actividad sísmica y fumarólica del volcán. Durante la formación del segundo domo hubo mayor saturación de los registros, bajo estas circunstancias, no se siguió el criterio de selección; para resolver el problema, se seleccionó el evento inmediato siguiente. Otro criterio de selección fue usado: Visualmente se desplegaron todos los sismogramas con el software SAC para revisar las trazas sísmicas con bajo nivel de ruido y con mejor definición del evento sísmico.

Las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 muestran los registros seleccionados del 9, 10, 15 y 16 de agosto de 2001 respectivamente seleccionados para su localización.

5.1. Frecuencia dominante

Las frecuencias dominantes de los eventos localizados se muestran en la gráfica de la figura 5.1. En esta figura se muestra que las frecuencias dominantes de los eventos localizados están comprendidas en el rango de 1.5 a 4 Hz. la frecuencia dominante característica estimada para la etapa del 9 al 16 de agosto sin considerar los días 11 al 14 es de 2.0 Hz. Los valores estimados se encuentran en las tablas 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 con sus respectivas localizaciones.

La figura 5.1 muestra que la frecuencia dominante presenta variaciones

Registro	Día Juliano	Hora Tiempo Local
1	221	07:14:17
2	221	08:09:17
3	221	10:39:17
4	221	11:14:17
5	221	12:14:17
6	221	12:44:17
7	221	13:54:17
8	221	14:54:17
9	221	15:39:17
10	221	16:54:17
11	221	17:59:17
12	221	18:39:17
13	221	19:44:17
14	221	21:04:17
15	221	22:24:17
16	221	22:59:17
17	221	23:54:17

Cuadro 5.1: Registros para localizar del día 9 de agosto de 2001

de hasta 1.5 Hz en los eventos del 9 de agosto, mientras que se estabilizan en 2 Hz durante el día 10 aproximadamente a las 17:24:17 horas con un máximo de 4 Hz a las 18:49:17 horas y un mínimo de 1.5 Hz a las 22:34 17 horas del mismo 10 de agosto. Las frecuencias dominantes correspondientes al 15 de agosto muestran variaciones de aproximadamente 1 Hz, mientras que el 16 la mayoría se mantienen estables alrededor de 2 Hz. Como se puede observar en la figura 6.1, las inestabilidades en las frecuencias dominantes ocurren antes del aumento de la actividad sísmica para las dos etapas de crecimiento de los dos domos de lava; el aumento de la actividad sísmica en RSAM posiblemente corresponde con la generación de los eventos de 2 Hz de frecuencia dominantes.

5.2. Localizaciones

Los resultados obtenidos son las coordenadas geográficas y elevaciones sobre el nivel del mar de las localizaciones de los eventos registrados del 9 al 16 de agosto de 2001 sin considerar los días 11 al 14 de agosto. Una característica de estas localizaciones es que se encuentran a profundidades someras; en términos de elevaciones, se encuentran entre 2750 y 4250 metros sobre el

No. Registro	Día juliano	Hora Tiempo Local
18	222	00:14:17
19	222	01:04:17
20	222	01:54:17
21	222	02:39:17
22	222	03:04:17
23	222	04:04:17
24	222	05:09:17
25	222	06:19:17
26	222	07:34:17
27	222	08:04:17
28	222	09:24:17
29	222	10:09:17
30	222	11:14:17
31	222	12:14:17
32	222	13:09:17
33	222	13:39:17
34	222	14:34:17
35	222	15:04:17
36	222	16:14:17
37	222	16:54:17
38	222	17:24:17
39	222	18:49:17
40	222	22:34:17

Cuadro 5.2: Registros para localizar del día 10 de agosto de 2001

nivel del mar; el evento con máximo error en la elevación fue de 550 metros, mientras que el evento con el mínimo error fue de 100 metros. Los eventos localizados se encuentran en el rango de -98.635 y -98.588 grados de longitud con un error máximo 1500 m y mínimo de 400 metros. Las latitudes mínima y máxima son 18.975 y 19.05 grados respectivamente con un máximo de error de 1500 metros y mínimo de 400 metros. De los 67 eventos seleccionados, 65 se localizan al S-SE del cráter, mientras que 2 se encuentran en la parte NW y NE del cráter respectivamente.

5.3. Incertidumbres en las localizaciones

Las tablas 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 muestran los errores obtenidos en la localización de cada evento usando los ángulos de incidencia aparentes; esto se

No. Registro	Día juliano	Hora Tiempo Local
41	227	03:09:17
42	227	03:54:17
43	227	05:19:17
44	227	06:44:17
45	227	09:04:17
46	227	09:49:17
47	227	11:24:17
48	227	12:29:17
49	227	15:29:17
50	227	16:04:17
51	227	17:09:17
52	227	20:14:17
53	227	21:09:17

Cuadro 5.3: Registros para localizar del día 15 de agosto de 2001

debe a que las líneas trazadas a partir de las estaciones a las fuentes con sus respectivos acimuts no se interceptan en un punto, sino que definen un área.

Neuberg, et. al.,(2000) [19] estudiaron los errores que se generan con la estimación del ángulo de incidencia debido a la interacción del campo de ondas con la superficie libre y la topografía con sismogramas sintéticos en perfiles 2D; el área de interacción está definida por la llamada zona de Fresnell que depende de la geometría fuente-receptor y de la longitud de onda de la señal sísmica. Los volcanes tienen en la mayoría de los casos características topográficas desde suaves hasta muy pronunciadas que también enmascaran la firma de la fuente sismo-volcánica original.

La dirección del movimiento de la partícula observada en una onda P en la superficie libre no apunta a la fuente (Figura 5.2); ésta también contiene la contribución de la onda convertida S. Neuberg, et. al.,(2000) [19] obtuvieron un factor de corrección para calcular el ángulo de incidencia a partir del ángulo aparente usando la ecuación

$$i = \sin^{-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \sin \frac{1}{2} \Phi \right) \quad (5.1)$$

donde α y β son las velocidades de las ondas P y S respectivamente. Neuberg, et. al.,(2000) [19] sustituyeron $\alpha/\beta = 1,5, 1,6, 1,7, 1,8$ y $1,9$ en la ecuación 5.1, y Φ de 0 a 90 grados, y encontraron que en ángulos de Φ mayores que 70 grados las curvas son muy planas y pequeños errores que resultan al obtener el ángulo de incidencia aparente $\delta\Phi$ podría producir errores más

No. Registro	Día juliano	Hora Tiempo Local
54	228	07:09:17
55	228	08:09:17
56	228	09:24:17
57	228	10:04:17
58	228	11:19:17
59	228	12:19:17
60	228	13:04:17
61	228	15:54:17
62	228	17:04:17
63	228	18:04:17
64	228	19:14:17
65	228	20:34:17
66	228	21:59:17
67	228	22:19:17

Cuadro 5.4: Registros para localizar del día 16 de agosto de 2001

grandes en δi (Figura 5.3).

5.4. Eventos del 9 de agosto

La tabla 5.5 muestra las localizaciones de 17 eventos que corresponden al 9 de agosto de 2001. Los resultados mostrados en esta tabla se encuentran graficados en planta en la figura 5.4; de la figura podemos observar que 15 de los eventos se encuentran al SE del cráter, mientras que 2 se localizan en la parte NW y NE del cráter respectivamente. Este grupo de eventos se localizan en el rango de latitudes mínimo y máximo de 18.975 a 19.05 grados respectivamente donde el evento con mínimo error fue de 400 m y el de máximo error fue de 1500 metros; el rango de longitudes es de -98.635 a -98.59 grados, donde el evento con mínimo error fue de 450 metros y el evento con máximo error fue de 1000 metros respectivamente. Las figuras 5.5 y 5.6 muestran 2 perfiles que cruzan el cráter del volcán en dirección N-S y E-W respectivamente. La elevación en que se encuentran los eventos, están en el rango de 2750 a 4200 msnm. El evento con un error máximo fue de 550 metros y el evento con error mínimo fue de 100 metros (figuras 5.5 y 5.6).

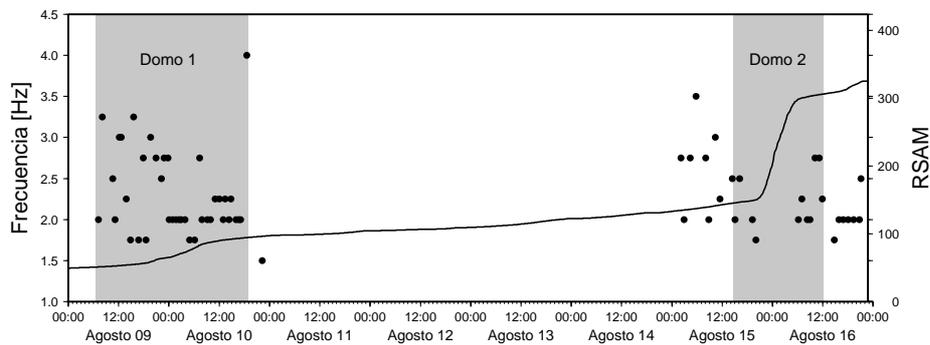


Figura 5.1: Frecuencias dominantes de los eventos localizados del 9 al 16 agosto de 2001

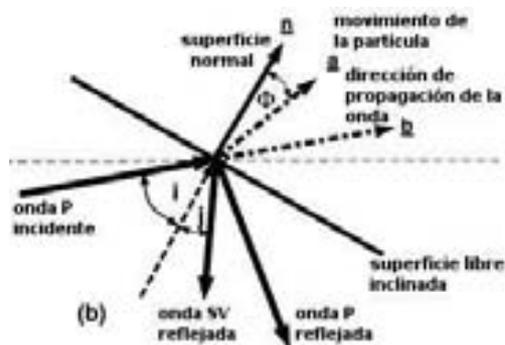


Figura 5.2: Angulo de incidencia y dirección del movimiento de la partícula de una superficie libre inclinada. Tomado de Neuberg, et. al.,(2000)[19]

5.5. Eventos del 10 de agosto

La tabla 5.6 muestra las localizaciones de 23 eventos que corresponden al 10 de agosto de 2001. Las coordenadas de esta tabla se encuentran graficadas en planta en la figura 5.7; de la figura podemos observar que los eventos se encuentran al S-SE del cráter. Este grupo de eventos se localizan en el rango de latitudes mínimo y máximo de 18.975 a 19.05 grados respectivamente; los eventos con el mínimo y máximo error respectivamente fueron de 800 y 1000 metros; el rango de longitudes está comprendido entre -98.635 y -98.59 grados; los eventos con mínimo y máximo error respectivamente fueron de 800 metros y 1000 metros. La elevación en que se encuentran están en el rango de 2750 a 4200 msnm, los eventos con el mínimo y máximo error respectivamente fueron de 100 y 550 metros (ver perfiles N-S y E-W en las figuras 5.8 y 5.9).

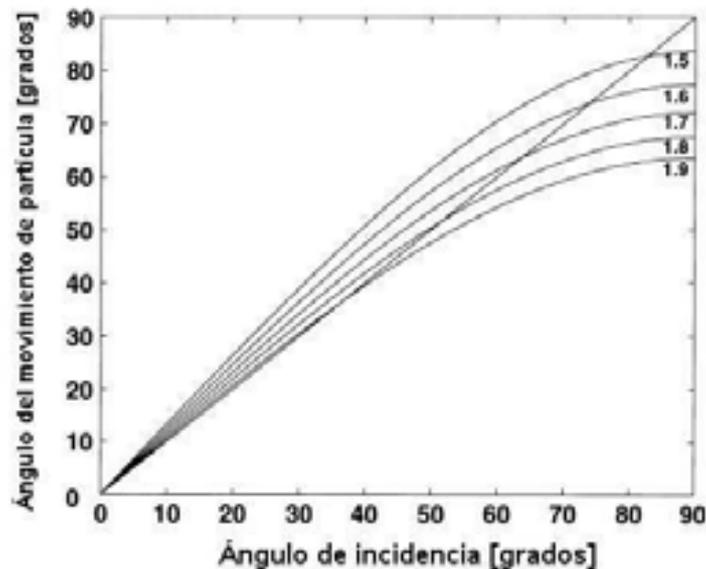


Figura 5.3: Ángulo de incidencia vs ángulo obtenido a partir de la dirección del movimiento de la partícula. Tomado de Neuberg, et. al.,(2000) [19]

5.6. Eventos del 15 de agosto

La tabla 5.7 muestra las localizaciones de 13 eventos que corresponden al 15 de agosto. Las coordenadas de esta tabla se encuentran graficadas en planta en la figura 5.10; de la figura podemos observar que los eventos se encuentran al S-SE del cráter. Este grupo de eventos se localizan en el rango de latitudes mínimo y máximo de 18.98 a 19.013 respectivamente; los eventos con errores respectivos mínimo y máximo fueron de 1000 metros y 1200 metros; el rango de longitudes está comprendido entre -98.63 y -98.595 grados; los eventos con los respectivos errores mínimo y máximo fueron de 1000 y 1200 m. Las elevaciones en que se encuentran están en el rango de 300 a 4100 msnm con un error máximo de 400 metros y mínimo de 250 metros (ver perfiles N-S y E-W en las figuras 5.11 y 5.12).

5.7. Eventos del 16 de agosto

La tabla 5.8 muestra las coordenadas de las localizaciones de 14 eventos que corresponden al 16 de agosto. Los resultados de esta tabla se encuentran graficados en planta en la figura 5.13; de la figura podemos observar que los eventos se encuentran al S-SE del cráter. Este grupo de eventos se localizan en el rango de latitudes mínimo y máximo de 18.988 a 19.015 grados

SEQ	Día	Hora local	Lon	Dstd	Lat	Dstd	Elev	Dstd	F[Hz]
1	221	07:14:17	-98.632	0.010	18.975	0.010	3000	300	2.00
2	221	08:09:17	-98.635	0.005	19.038	0.005	4100	100	3.25
3	221	10:39:17	-98.635	0.004	19.013	0.004	4200	250	2.50
4	221	11:14:17	-98.620	0.010	19.015	0.010	3700	500	2.00
5	221	12:14:17	-98.610	0.010	18.990	0.010	3200	450	3.00
6	221	12:44:17	-98.600	0.010	19.050	0.010	3200	450	3.00
7	221	13:54:17	-98.600	0.010	19.005	0.010	3600	500	2.25
8	221	14:54:17	-98.600	0.009	19.000	0.009	3000	300	1.75
9	221	15:39:17	-98.615	0.014	18.995	0.014	3700	500	3.25
10	221	16:54:17	-98.600	0.015	19.000	0.009	2750	450	1.75
11	221	17:59:17	-98.590	0.010	19.005	0.015	3500	550	2.75
12	221	18:39:17	-98.590	0.010	19.000	0.011	3400	500	1.75
13	221	19:44:17	-98.590	0.008	19.015	0.008	3300	400	3.00
14	221	21:04:17	-98.625	0.006	19.000	0.006	3600	400	2.75
15	221	22:24:17	-98.613	0.008	18.990	0.008	3100	400	2.50
16	221	22:59:17	-98.595	0.008	19.010	0.008	3300	400	2.75
17	221	23:54:17	-98.610	0.008	19.000	0.008	3200	400	2.75

Cuadro 5.5: Eventos localizados del 9 de agosto de 2001

respectivamente, con errores mínimo y máximo de 1000 y 1200 metros respectivamente; el rango de longitudes está comprendido entre -98.625 y -98.588 grados; respectivamente los eventos con errores mínimo y máximo fueron de 1000 y 1200 metros. La elevación en que se encuentran están en el rango de 2900 a 3200 msnm; los eventos con mínimo y máximo error respectivamente fueron de 300 y 350 metros (ver perfiles N-S y E-W de las figuras 5.14 y 5.15).

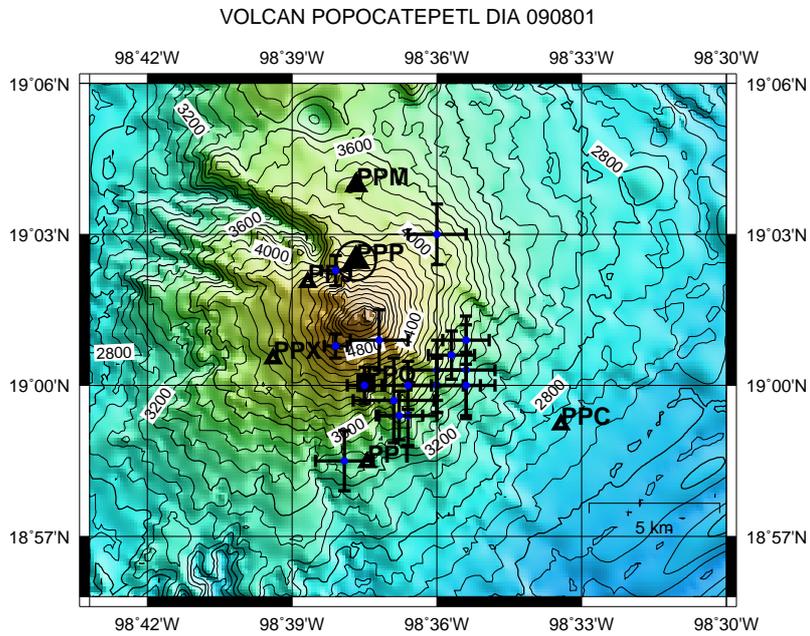


Figura 5.4: Eventos localizados del 9 de Agosto de 2001 (221)

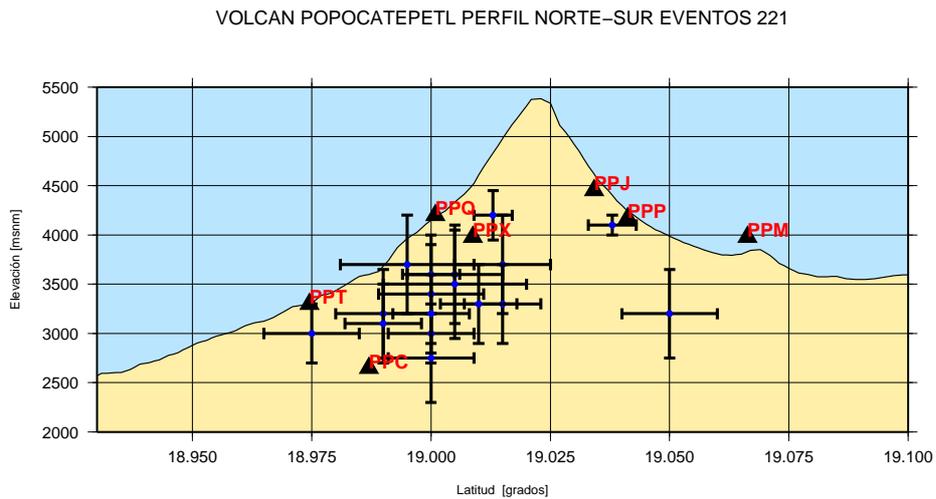


Figura 5.5: Eventos localizados del 9 de Agosto de 2001 (221) Perfil N-S

VOLCAN POPOCATEPETL PERFIL ESTE-OESTE 221

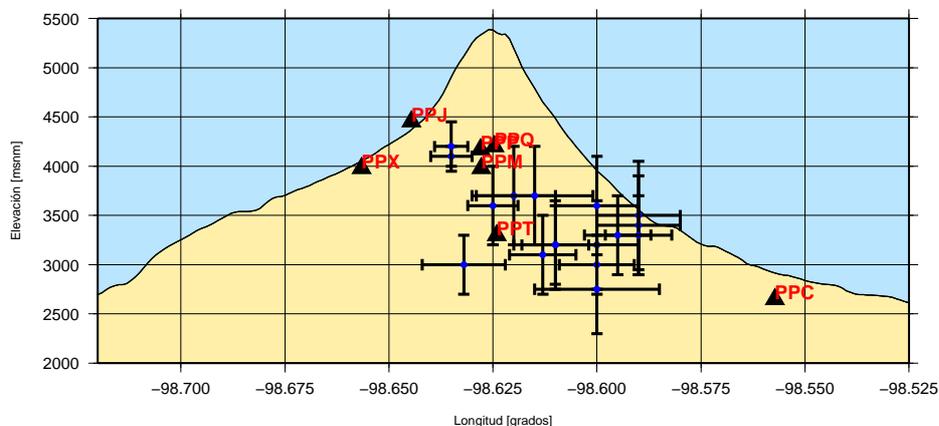


Figura 5.6: Eventos localizados del 9 de Agosto de 2001 (221) Perfil E-O

SEQ	Día	Hora local	Lon	Dstd	Lat	Dstd	Elev	Dstd	F[Hz]
18	222	00:14:17	-98.610	0.008	18.995	0.008	3400	400	2.00
19	222	01:04:17	-98.605	0.008	19.012	0.008	3800	400	2.00
20	222	01:54:17	-98.628	0.008	19.011	0.008	4000	500	2.00
21	222	02:39:17	-98.610	0.008	19.010	0.012	4000	300	2.00
22	222	03:04:17	-98.602	0.010	19.005	0.010	4000	300	2.00
23	222	04:04:17	-98.601	0.010	19.010	0.010	4000	300	2.00
24	222	05:09:17	-98.601	0.010	19.010	0.010	4000	300	1.75
25	222	06:19:17	-98.608	0.010	19.025	0.010	4100	300	1.75
26	222	07:34:17	-98.619	0.010	18.995	0.010	3700	300	2.75
27	222	08:04:17	-98.630	0.010	19.005	0.010	4100	300	2.00
28	222	09:24:17	-98.630	0.010	19.005	0.010	4200	300	2.00
29	222	10:09:17	-98.600	0.010	19.005	0.015	3800	300	2.00
30	222	11:14:17	-98.600	0.010	19.010	0.015	3900	400	2.25
31	222	12:14:17	-98.620	0.010	19.000	0.015	4200	250	2.25
32	222	13:09:17	-98.635	0.010	19.010	0.010	4100	300	2.00
33	222	13:39:17	-98.625	0.010	19.005	0.010	4150	300	2.25
34	222	14:34:17	-98.620	0.010	19.015	0.010	4150	300	2.00
35	222	15:04:17	-98.625	0.010	18.990	0.010	3400	300	2.25
36	222	16:14:17	-98.625	0.012	19.015	0.012	4250	350	2.00
37	222	16:54:17	-98.625	0.010	18.990	0.010	3200	350	2.00
38	222	17:24:17	-98.620	0.010	18.995	0.010	3300	400	2.00
39	222	18:49:17	-98.590	0.010	19.010	0.010	3200	300	4.00
40	222	22:34:17	-98.605	0.010	19.010	0.010	3100	300	1.50

Cuadro 5.6: Eventos localizados del 10 de agosto de 2001

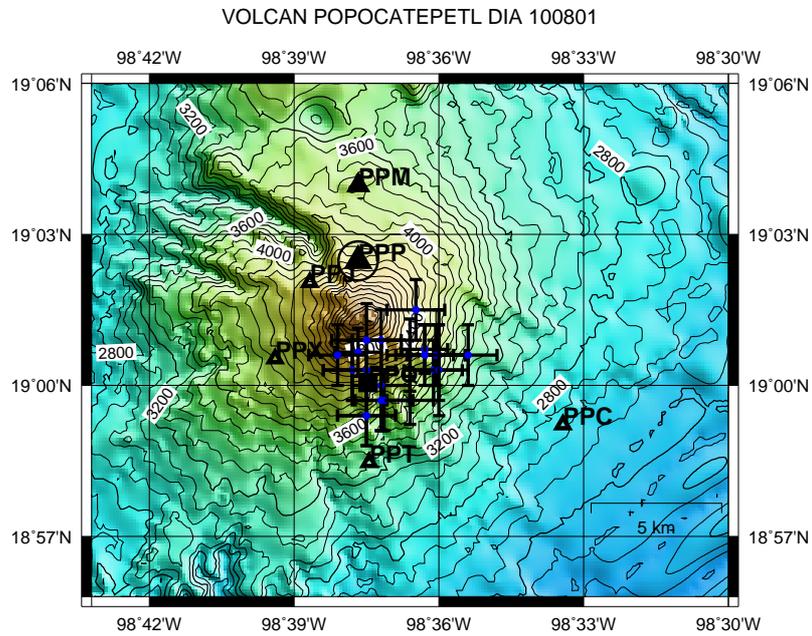


Figura 5.7: Eventos localizados del 10 de Agosto de 2001 (222)

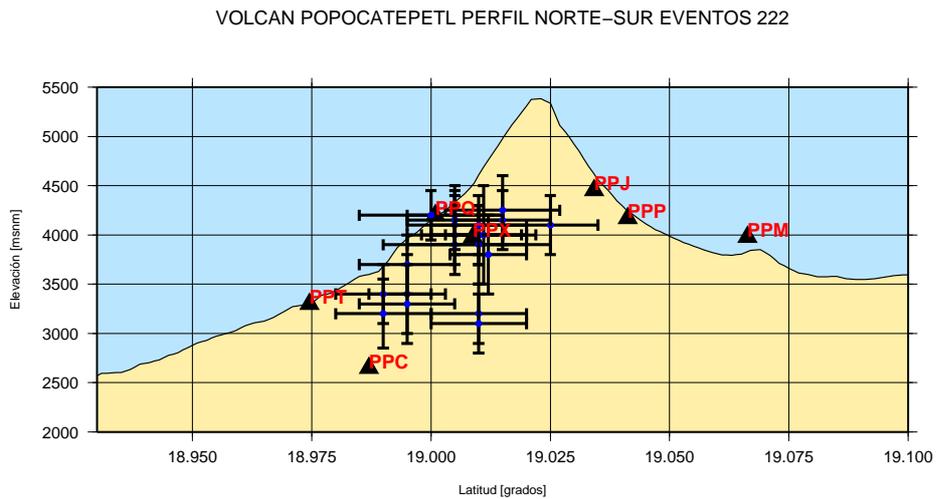


Figura 5.8: Eventos localizados del 10 de Agosto de 2001 (222) Perfil N-S

VOLCAN POPOCATEPETL PERFIL ESTE-OESTE 222

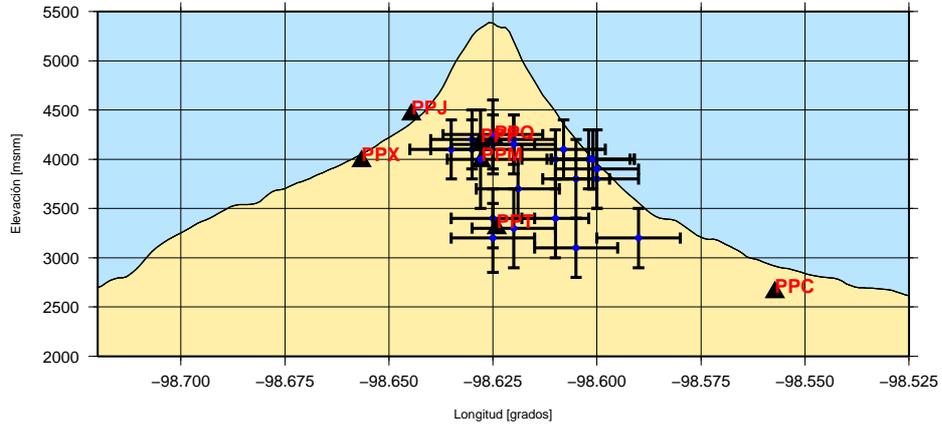


Figura 5.9: Eventos localizados del 10 de Agosto de 2001 (222) Perfil E-O

SEQ	Día	Hora local	Lon	Dstd	Lat	Dstd	Elev	Dstd	F[Hz]
41	227	03:09:17	-98.595	0.010	19.005	0.010	3100	300	2.75
42	227	03:54:17	-98.620	0.010	18.995	0.010	3550	400	2.00
43	227	05:19:17	-98.625	0.010	19.005	0.010	4100	250	2.75
44	227	06:44:17	-98.610	0.010	19.008	0.010	4000	350	3.50
45	227	09:04:17	-98.605	0.010	19.013	0.010	3900	350	2.75
46	227	09:49:17	-98.620	0.010	19.013	0.010	4100	300	2.00
47	227	11:24:17	-98.630	0.010	18.995	0.010	3900	300	3.00
48	227	12:29:17	-98.620	0.010	19.000	0.010	3950	250	2.25
49	227	15:29:17	-98.630	0.010	19.000	0.010	3950	350	2.50
50	227	16:04:17	-98.625	0.010	19.005	0.010	4000	300	2.00
51	227	17:09:17	-98.610	0.010	18.993	0.010	3000	300	2.50
52	227	20:14:17	-98.622	0.010	18.980	0.010	3000	300	2.00
53	227	21:09:17	-98.600	0.012	19.010	0.012	3100	300	1.75

Cuadro 5.7: Eventos localizados del 15 de agosto de 2001

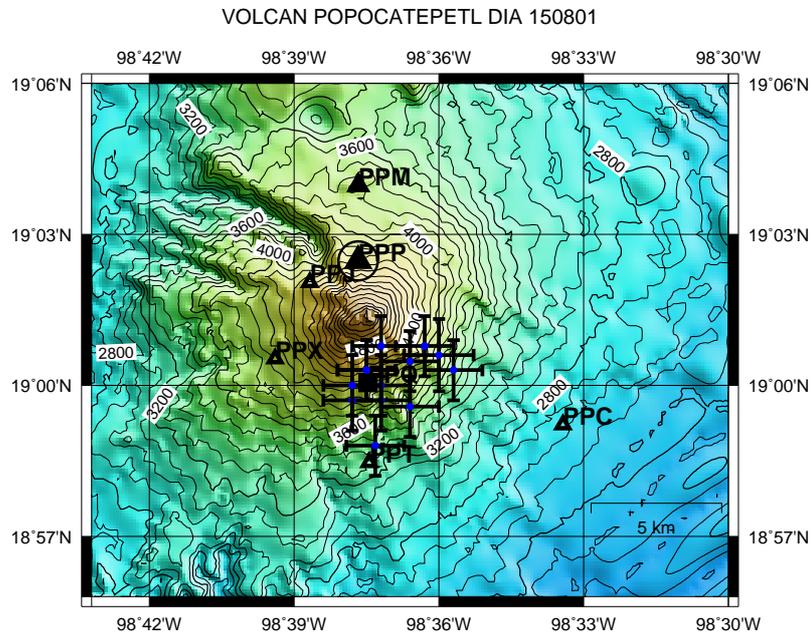


Figura 5.10: Eventos localizados del 15 de Agosto de 2001 (227)

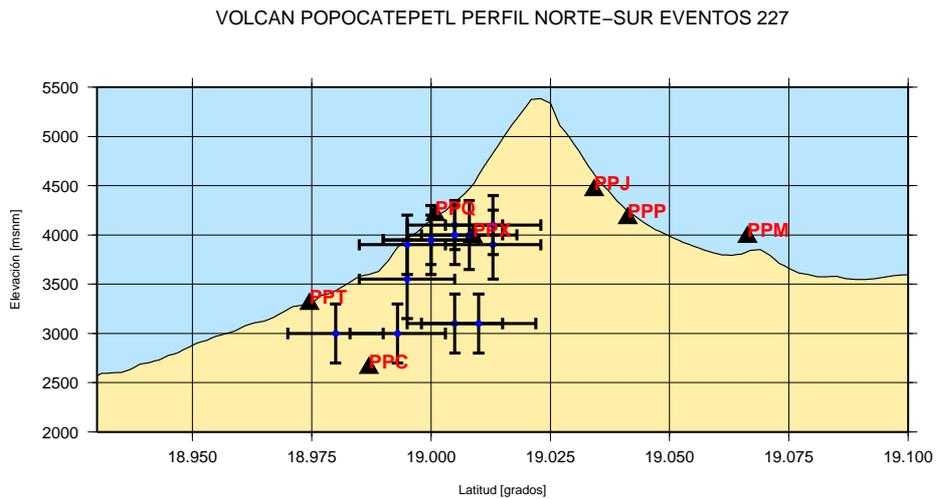


Figura 5.11: Eventos localizados del 15 de Agosto de 2001 (227) Perfil N-S

VOLCAN POPOCATEPETL PERFIL ESTE-OESTE 227

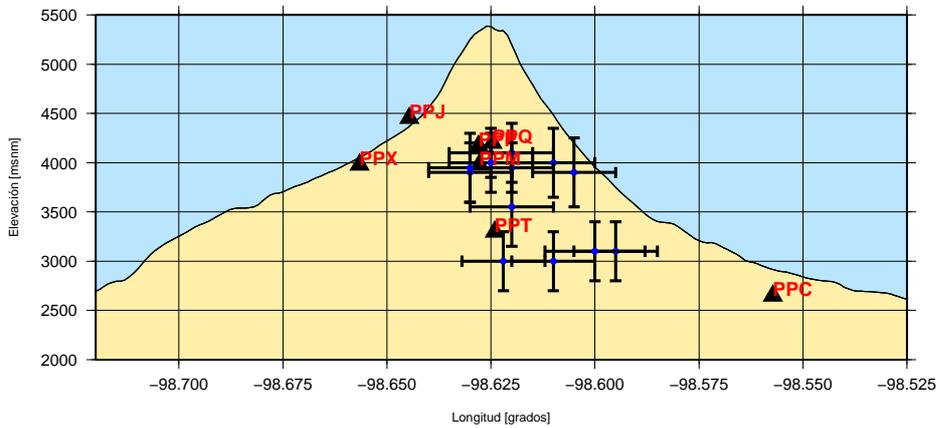


Figura 5.12: Eventos localizados del 15 de Agosto de 2001 (227) Perfil E-O

SEQ	Día	Hora local	Lon	Dstd	Lat	Dstd	Elev	Dstd	F[Hz]
54	228	07:09:17	-98.600	0.010	19.005	0.010	3200	300	2.00
55	228	08:09:17	-98.618	0.010	18.995	0.010	3200	300	2.00
56	228	09:24:17	-98.625	0.010	18.995	0.010	2900	350	2.00
57	228	10:04:17	-98.590	0.010	19.015	0.010	3000	350	2.00
58	228	11:19:17	-98.595	0.010	19.010	0.010	3200	350	2.75
59	228	12:19:17	-98.590	0.010	19.005	0.010	3100	350	2,75
60	228	13:04:17	-98.610	0.010	18.990	0.010	2900	350	2.25
61	228	15:54:17	-98.593	0.012	19.012	0.012	3000	350	1.75
62	228	17:04:17	-98.598	0.012	19.012	0.012	3000	350	2.00
63	228	18:04:17	-98.615	0.010	19.007	0.010	2900	350	2.00
64	228	19:14:17	-98.602	0.012	18.988	0.012	2950	350	2.00
65	228	20:34:17	-98.588	0.012	19.000	0.012	2950	350	2.00
66	228	21:59:17	-98.612	0.012	19.002	0.012	2950	350	2.00
67	228	22:19:17	-98.590	0.012	19.012	0.012	2950	350	2.50

Cuadro 5.8: Eventos localizados del 16 de agosto de 2001

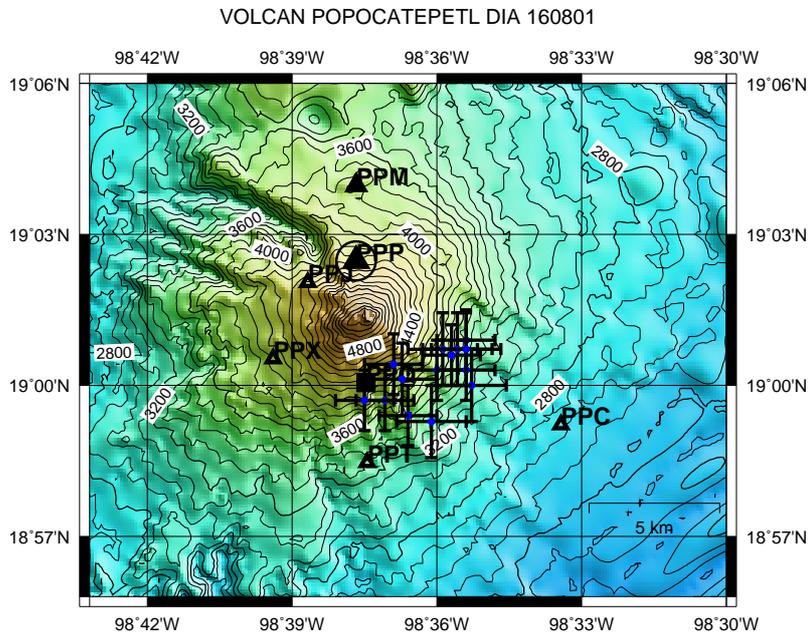


Figura 5.13: Eventos localizados del 16 de Agosto de 2001 (228)

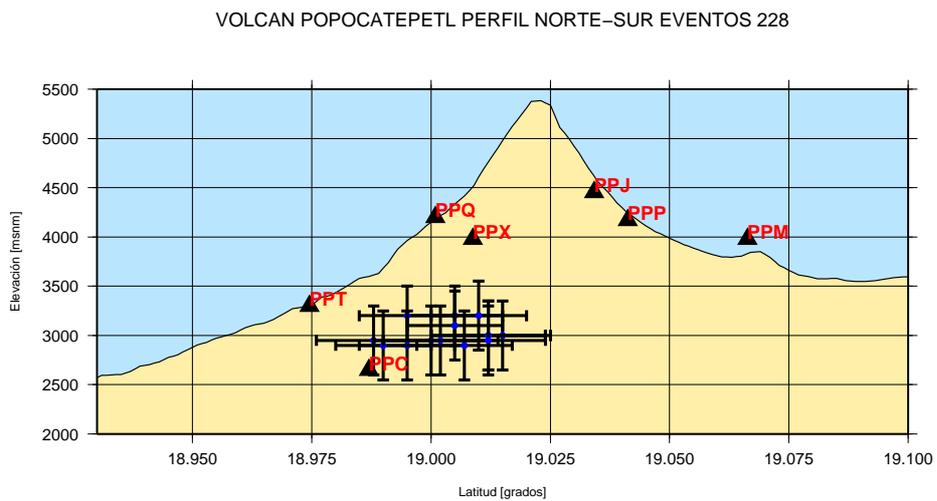


Figura 5.14: Eventos localizados del 16 de Agosto de 2001 (228) Perfil N-S

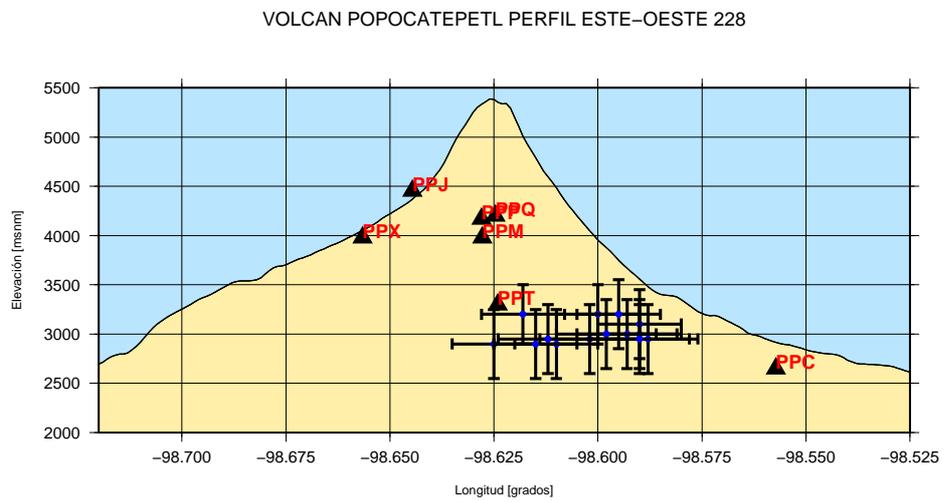


Figura 5.15: Eventos localizados del 16 de Agosto de 2001 (228) Perfil E-O

Capítulo 6

Discusión de los resultados

Las gráficas de las figuras 4.2 a 4.7 muestran el número de eventos contados en intervalos de 5 minutos para las tres componentes de las estaciones PPJ, PPX, PPT, PPC, PPQ, PPM y PPP de período corto. El máximo número de eventos contados es de 12, debido a esto, conservamos este valor como máximo para las tres componentes de todas las estaciones para todas las escalas gráficas.

Durante el crecimiento del primer domo, la cantidad de eventos muestran valores máximos a las 9:00 horas del 10 de agosto, a las 17 horas del 10 de agosto y a la 1:30 horas del 16 de agosto respectivamente. La cantidad de eventos máximos observados en todas las estaciones de mayor a menor son: a la 1:30 horas del 16 de agosto, seguido por el de las 17 horas del 10 de agosto y al último el de las 9 horas del 10 de agosto. El número de eventos contados también muestran valores máximos a las 22 horas del 16 de agosto.

Los eventos contados también muestran que las estaciones más cercanas al cráter presentan mayor número de eventos en las estaciones PPJ, PPX, PPT, PPP y PPQ en los que se contabilizaron hasta 8 eventos, mientras que PPC y PPM presentan valores menores a 6 eventos, excepto la componente PPM norte, que tiene hasta 8 eventos; estas dos estaciones se localizan más lejos del cráter.

Del análisis del número de eventos cada 5 minutos deducimos que la actividad sísmica fue mayor en la parte somera del volcán cercana al cráter; la estación PPT que corresponde a las estaciones con mayor número de eventos registrados es la que tiene mayor distancia del cráter sin contar PPC y PPM, indica que la sismicidad se encuentra entre 3000 a 4000 metros sobre el nivel del mar.

Por otra parte, RSAM calcula el promedio de los registros sísmicos en

intervalos de 10 minutos (para el volcán Popocatepetl); el incremento en la amplitud de los tremores o tasa de ocurrencia y el tamaño de los eventos causan que los valores de RSAM se incrementen; en vez de enfocarse en los eventos individuales, RSAM suma las señales de todos los eventos durante intervalos de 10 minutos para proveer información simplificada pero muy útil acerca del nivel de la actividad sísmica.

Los eventos registrados del 9 al 16 de agosto de 2001 se correlacionan con la etapa de creación de los dos domos de lava mostrados en la curva RSAM (Figura 4.1); RSAM muestra un aumento en la actividad sísmica del volcán el 9 de agosto cuando cambia del valor de 50 a 90 de las 17:00 horas del 9 de agosto a las 12 horas del 10 de agosto respectivamente; este período corresponde con la creación del primer domo de lava. La figura 6.1 muestra una imagen del volcán a las 22:35 horas del 9 de agosto, donde se observa la iluminación producida por el material incandescente debido al primer domo; el CENAPRED reportó emisiones de ceniza y vapor de agua (CENAPRED, 2001)[5]. El cambio en la pendiente de la curva se observa a las 21:00 horas del 15 de agosto con valor de 160 y aumenta hasta 300 a las 6 horas del 16 de agosto. Esta segunda etapa corresponde con la formación del segundo domo.

Las amplitudes de los eventos registrados durante la formación del segundo domo saturaron la mayoría de los registros durante esta etapa; el número de eventos para todas las estaciones se estimaron con la ayuda de las estaciones más lejanas del cráter PPM y PPC o las estaciones vecinas cuando no ocurría en estas la saturación; lo mismo ocurrió con algunos registros saturados durante la generación del primer domo, pero en menor cantidad de registros; también se usó el mismo criterio.

Las dos etapas de máxima actividad sísmica mostradas en la curva RSAM coinciden con los máximos de las curvas de las graficas que contienen el número de eventos contados cada 5 minutos. El máximo reportado por el número de eventos a las 22:00 horas del 16 de agosto se refleja mejor en la curva RSAM con un cambio menor en la pendiente posiblemente debido a que la actividad sísmica fue menos importante, pues la energía necesaria para comenzar a formar el segundo domo ya había sido liberada.

La gráfica de la figura 5.1 muestra las frecuencias estimadas de los eventos seleccionados y localizados contra el tiempo que comprende los días 9 al 16 de agosto de 2001; en esta gráfica también se incluye la curva RSAM para comparar la relación entre las frecuencias dominantes de los eventos localizados y la actividad sísmica del volcán.

La figura 5.1 muestra que las frecuencias se encuentran en el rango de 1.75



Figura 6.1: Imágen del volcán cortesía del CENAPRED

a 3.5 Hz principalmente con excepción de 2 frecuencias: 4 Hz a las 18:49:17 del 10 de agosto y 1.5 a las 22:34:17 del mismo día. La frecuencia característica corresponde a 2.0 Hz; también observamos que durante el 9 de agosto las frecuencias presentan más variaciones respecto al día 10, mientras que las frecuencias de los eventos del 15 presentan el mismo comportamiento. sugerimos que en las etapas de alta sismicidad (como se observa en RSAM), las frecuencias son más estables alrededor de 2 Hz debido a que la actividad sísmica es característica de eventos tipo LP(Período Largo por sus siglas en inglés).

Debido a las incertidumbres en la estimación de las frecuencias dominantes, la construcción del movimiento de la partícula confirmó la localización obtenida a partir del método de polarización. La polarización de las ondas sísmicas a través del tiempo muestra con detalle la variación del acimut y el ángulo con que llegan las ondas a las estaciones, principalmente en la ventana de tiempo de interés después de ser filtradas con el filtro pasabandas en la frecuencia de interés(frecuencia dominante).

Para analizar la relación entre la curva RSAM y las localizaciones de todos los eventos, se graficaron contra el tiempo la longitud, latitud y elevación en la figuras 6.6, 6.7 y 6.8. La actividad sísmica representada por la curva RSAM de las figuras 6.6, 6.7 y 6.8 muestran que localizar los eventos con intervalos de aproximadamente 1 hora como se tenía planeado inicialmente no fue posible debido a la presencia de registros saturados, principalmente entre las 19:04:17 horas del 9 a las 6:04:17 horas del 10 de agosto y de las

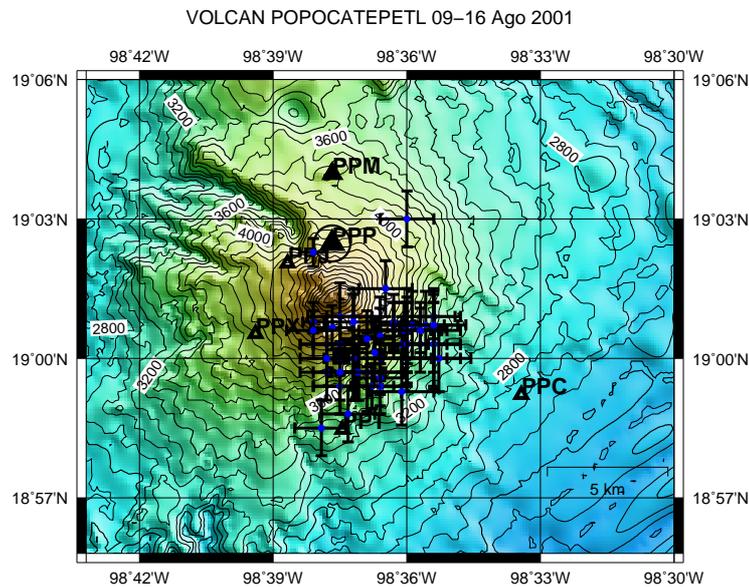


Figura 6.2: Eventos 9-16 de agosto de 2001

22:04:07 horas del 15 de agosto a las 5:07:17 horas del 16 de agosto (la mayoría estaban saturados).

La figura 6.3 muestra una vista 3D de los eventos generados por el volcán durante los días 9 al 16 de agosto de 2001; en la figura se muestran los eventos unidos por una línea de un mismo color por día: los eventos del día 9 están unidos por una línea negra, los del 10 por una roja, los del 15 por una línea verde y los del 16 por una línea azul.

La figura 6.6 muestra que el rango de elevaciones de los eventos localizados los días 9 y 10 de agosto oscilan entre 2700 y 4200 msnm; la elevación promedio de los dos días es de 3500 msnm; en la figura 6.6 también se observa que cuando la curva RSAM regresa a un nivel de estabilidad entre el 9-10 y 15-16 de agosto, los eventos se localizaron en zonas más profundas. El 15 de agosto el rango de elevaciones fue de 3200 a 4000 m, finalmente el 16 de agosto las elevaciones se mantienen más estables alrededor de 3200 metros cuando se estabiliza la curva RSAM. La pendiente más fuerte en RSAM entre el 15 y 16 de agosto coincide con la mayoría de los registros saturados; antes de la pendiente los eventos se presentaron 1000 metros más arriba que después de la pendiente, esto es, durante la generación del segundo domo.

La figura 6.7 muestra que durante el inicio de la actividad sísmica el 9 de agosto el primer evento seleccionado se localizó al este del cráter a las 7:00 horas aproximadamente en la longitud -98.632 grados; la sismicidad estaba

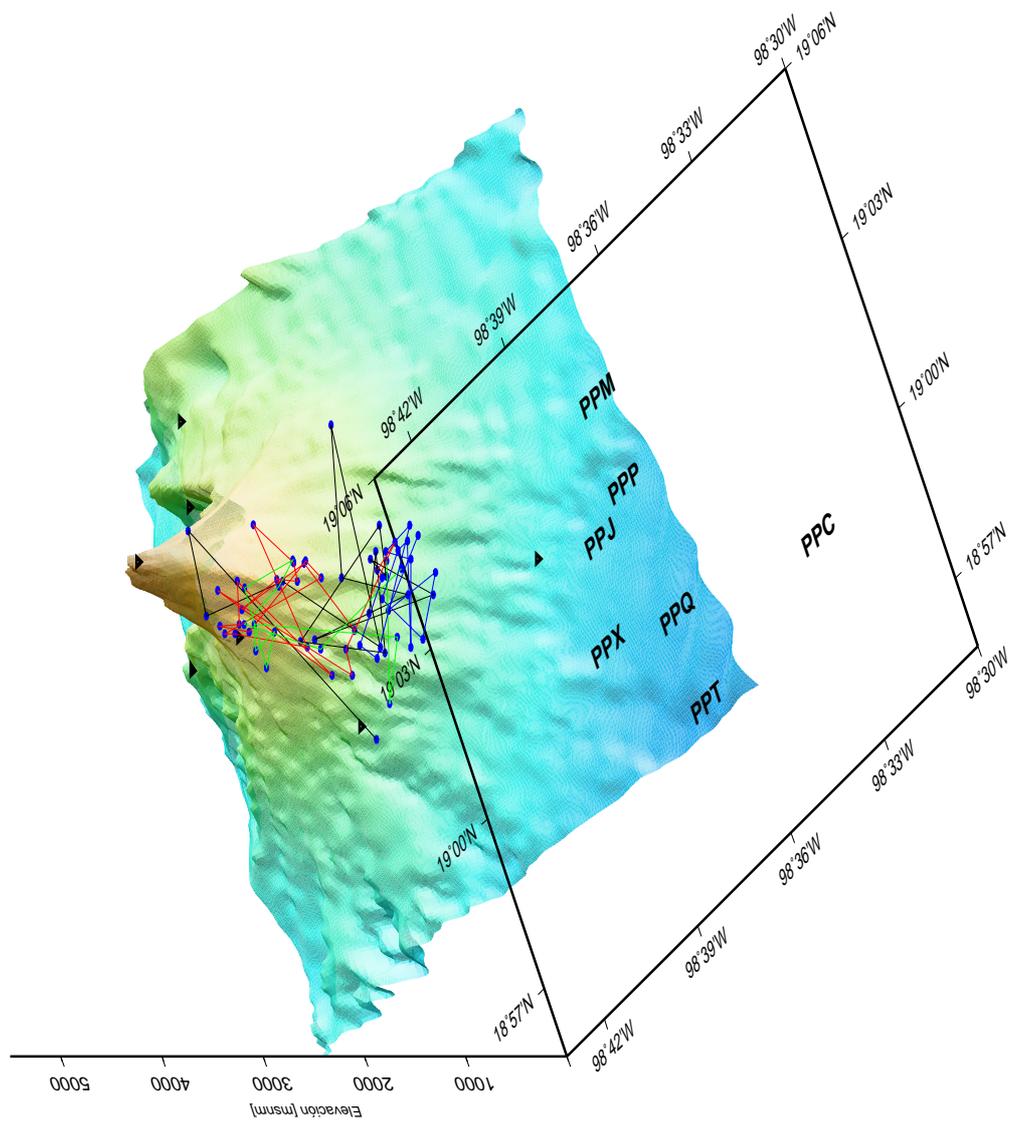


Figura 6.3: Vista 3D del volcán con la secuencia de los eventos del 9-16 Agosto de 2001

VOLCAN POPOCATEPETL PERFIL NORTE-SUR 09-16 Ago 2001

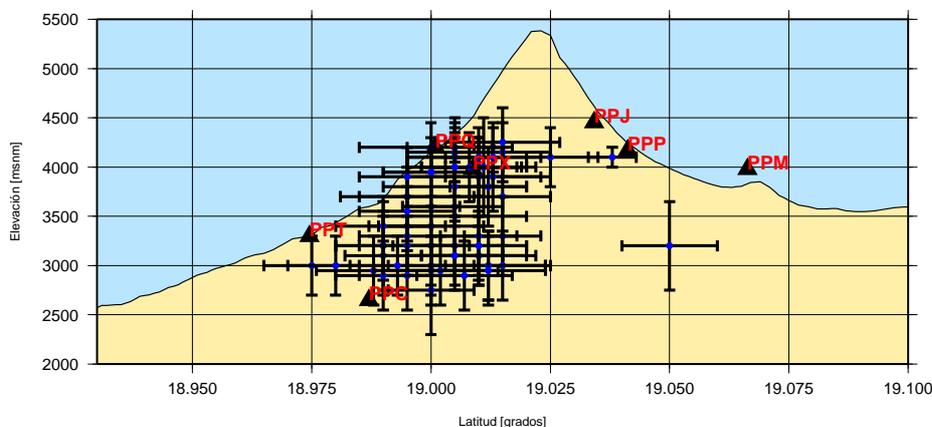


Figura 6.4: Eventos 9-16 de agosto Perfil N-S

migrando hacia el este hasta las 19:44 horas llegando a una longitud de -98.59 grados, después de las 19:44 horas, la sismicidad estaba retornando al oeste hasta llegar a las 20:00 horas del 10 de agosto en el rango de longitudes de -98.62 a -98.63 grados. Los valores RSAM muestran la misma tendencia, sugiriendo que los eventos migraron hacia el este conforme la actividad volcánica iba en aumento manteniéndose en el este en -98.59 grados de longitud, conforme la actividad sísmica se estabilizaba después de la primera pendiente fuerte en RSAM, los eventos retornaron al oeste hasta la longitud de -98.632 grados.

Durante la generación del segundo domo, el 15 de agosto los eventos localizados se presentaron en una longitud de -98.62 grados con una tendencia hacia el este; después de la liberación de la energía, el 16 de agosto los eventos se encontraban corridos al este hasta longitudes de -98.59 grados. La figura 6.8 muestra que los eventos se encuentran concentrados al S-SE del cráter.

La figura 5.4 muestra que los eventos del 9 de agosto se encuentran localizados en un radio menor a 6 kilómetros del cráter; estos resultados corresponden con las gráficas que muestran el número de eventos cada 5 minutos de las estaciones más cercanas al cráter PPJ con 6 eventos, PPX con 5 y PPP con 6 eventos respectivamente de las figuras 4.2, 4.3 y 4.7. La estación más cercana al cráter es PPP con el mayor número de eventos considerando de las 7:14:17 horas a las 23:59:17 horas del 9 de agosto. El número de eventos en las estaciones más lejanas como PPM de la figura 4.6 llegan a 3, mientras el máximo número de eventos en PPC llega a 4 al final del día alrededor de las 22:04:17 horas. El 9 de agosto a las 7:49:17 horas, comenzó la extrusión de lava generando un domo con un volúmen de 190 metros de diámetro y 30

VOLCAN POPOCATEPETL PERFIL ESTE-OESTE 09-16 Ago 2001

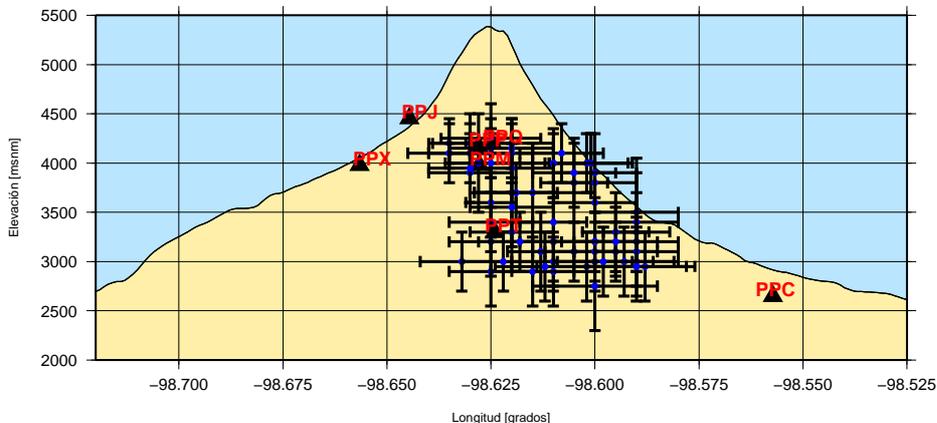


Figura 6.5: Eventos 9-16 de agosto de 2001 Perfil E-W

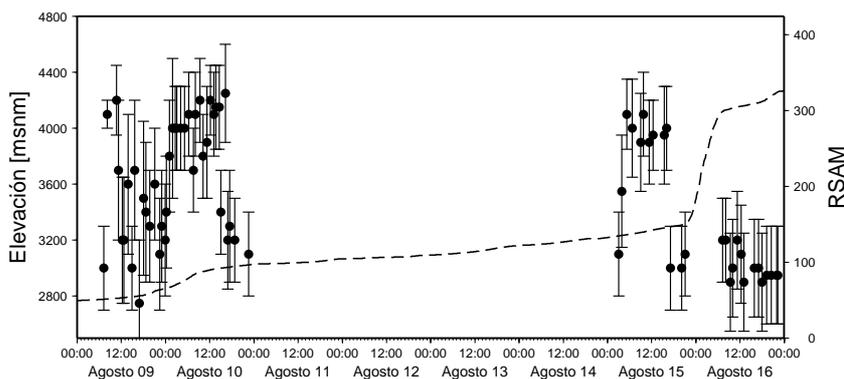


Figura 6.6: Elevación vs Tiempo 9-16 Agosto de 2001

metros de altura(CENAPRED, Reportes diarios).

La intensidad de la actividad sísmica aumentó alrededor de las 16:00 horas del 9 de agosto con exhalaciones de ceniza y vapor de agua del cráter lo cual se observó durante los días 9-16 de agosto; la observación directa de la actividad se correlaciona con las profundidades someras de todos los eventos localizados (Ver fotografía mostrada en la figura 6.1). La gráfica de la figura 6.6 muestra que con el aumento de la actividad sísmica reportada por RSAM el 9 de agosto después de las 22:00 horas, las elevaciones de los eventos muestran que la sismicidad se mantiene en el rango de profundidades de 1200 a 1500 metros aproximadamente debajo del cráter, fue durante esta etapa que se generó el primer domo de lava.

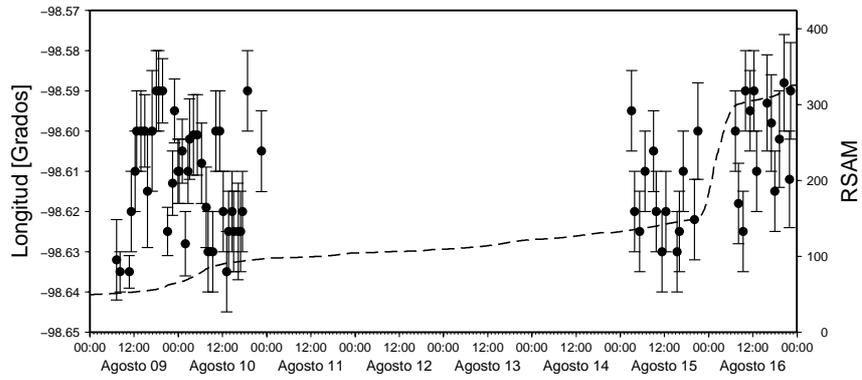


Figura 6.7: Longitud vs Tiempo 9-16 Agosto de 2001

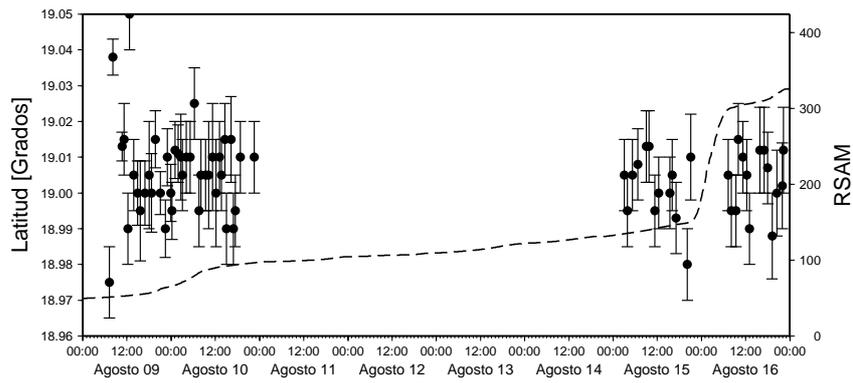


Figura 6.8: Latitud vs Tiempo 9-16 Agosto de 2001

El 15 de agosto a las 15:45 horas comenzó un episodio de mayor actividad sísmica que el anterior como lo muestra la curva RSAM, esta etapa fue de mayor intensidad que la del 9 de agosto. Las elevaciones de los eventos localizados antes de la segunda pendiente (el 15 de agosto) en RSAM muestran valores de 3600 a 4100 metros sobre el nivel del mar. De las 16:00 a las 20:00 horas se localizaron 3 eventos con elevaciones de 2900 a 3100 msnm; estas elevaciones las asociamos posiblemente al estado de esfuerzos que estaba ocurriendo 1 hora antes de la etapa de máxima actividad sísmica. De las 18:00 a las 6:00 horas, la actividad sísmica ocurrió con emisión de lava, ceniza y vapor de agua. De las 6:00 a las 11:00 horas del día 16 de agosto, la elevación de las fuentes se mantuvieron en el rango de 2900 a 3200 msnm.

Capítulo 7

Conclusiones

Los eventos analizados muestran una alta polarización lineal y frecuencias dominantes de 2 Hz; las frecuencias dominantes son características en los eventos sísmicos del tipo LP, asociados al paso de fluidos a través de fracturas en los conductos del volcán.

El análisis por medio del movimiento de la partícula fue necesario para confirmar algunas localizaciones de los eventos. Las razones espectrales con el método de Nakamura indican un efecto de sitio debajo de las estaciones en el rango de frecuencias entre 4 y 6 Hz con valores de H/V de 4, estas frecuencias no interfirieron con nuestro análisis.

Se estimaron cuantitativamente los parámetros de polarización: acimut, linealidad y ángulo medido a partir del eje vertical positivo con los datos sísmicos filtrados en la frecuencia dominante, mientras que las localizaciones de los eventos fueron estimadas cualitativamente con la intersección de las direcciones proyectadas por la máxima linealidad en los eventos y el movimiento de la partícula; con este objetivo fue desarrollado el programa **COVMATMEX** en lenguaje FORTRAN 77.

Las localizaciones de los eventos LP muestran una actividad somera cercana al cráter entre 2700 y 4200 msnm durante los días 9 y 10 de Agosto y se encuentran dispersos en este rango de elevaciones. Los días 15 y 16 de Agosto las elevaciones se encuentran entre 3100 y 4200 msnm, éstas se mantienen estables en promedio en 4000 y 2900 msnm antes y después de la etapa extrusiva respectivamente. La primera etapa está relacionada con las presiones en las fracturas durante el ascenso de material ígneo al comienzo de la actividad volcánica, mientras que en la segunda etapa los días 15 y 16 las altitudes de las localizaciones son más estables debido a que ya se había liberado la energía durante la primera etapa.

La liberación de energía los días 9 y 10 de agosto ocurrió cuando la velocidad de extrusión de lava que generó el primer domo era de entre $7-8 m^3/s$ (Dr. Carlos Valdes-Comunicación personal), menor que la velocidad de extrusión de los días 15 y 16 de agosto ($12 m^3/s$) que formó un domo sobre el primero, lo que sugiere un ascenso constante de material ígneo debido a que los conductos ya no estaban obstruidos. Por otra parte, las frecuencias dominantes se estabilizaron alrededor de 2 Hz aproximadamente después del crecimiento de los dos domos.

Rodríguez-Pérez(2004)[20] obtuvo el rango de altitudes de 4000 a 4400 msnm durante la generación de un domo de volumen $1 \times 10^6 m^3$ en el volcán Popocatepetl con datos del 16 de abril de 2001 en 13 horas, mientras que el volumen alcanzado durante los días 9 al 16 de agosto fue de 0.8 millones de metros cúbicos en 8 días; la diferencia en elevaciones fue de 400 metros. Las dos actividades volcánicas son de fuentes someras.

La actividad sísmica se localizó principalmente al S-SE del cráter a distancias menores de 5 km. Las poblaciones más cercanas a los epicentros son Santa Catalina, San Pedro Benito Juárez, Tetela del Volcán, Hueyapan y Santa Cruz.

La localización de los eventos durante esta etapa de intensa actividad permiten estimar el riesgo en el sector Sur-Este; dicho sector es el más débil estructuralmente (Dr. Carlos Valdés, comunicación personal), ya que es la zona más baja del cráter conocida como *ElChimuelo* y que se formó durante la actividad del volcán en 1963. Es también éste sector en donde se encuentra la población de San Pedro Benito Juárez a 12 km del cráter. El análisis aquí presentado servirá de comparativo en subsecuentes crisis y permitirá definir cambios o alteraciones en este importante sector del volcán Popocatepetl.

Bibliografía

- [1] Aldana J.C. (2000). *Análisis multidimensional de registros sísmicos el caso de un valle aluvial en Nueva Zelanda*. Tesis para obtener el título de ingeniero geofísico. IPN-ESIA Ticomán. México, D.F.
- [2] Arámbula M.R. 1994. *Localización de tremores asociados a la crisis volcánica de 1994*. Tesis para obtener el título de ingeniero geofísico. Facultad de ingeniería, UNAM.
- [3] Arciniega-Ceballos, A. Chouet, B. Dawson, P. (2003). *Long-periods events and tremor at Popocatepetl volcano (1994-2000) and their broadband characteristics*. Bulletin Volcanology. Vol 65, pages 124-135.
- [4] Bergman E. (2001). *Global Volcanism Program*. Smithsonian National Museum of Natural History. <http://www.volcano.si.edu>.
- [5] CENAPRED. (2005). *Reporte de la actividad Agosto 2001*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. <http://www.cenapred.unam.mx>.
- [6] Del Pezzo E., Gordano C., Gorini A., Martini M. (2002). *Wave polarization and location of source of the explosion quakes at Stromboli volcano*. Journal of volcanology and geothermal research. Vol. 119, page 27.
- [7] Endo E.T. and Murray T. (1991). *Real Time Seismic Amplitude Measurement (RSAM): a volcano monitoring and prediction tool*. Bulletin of Volcanology. Vol. 53, pages 553-545.
- [8] Etter D.M. (1997). *Solución de problemas de ingeniería con MATLAB*. Prentice Hall, pages 241-248.
- [9] Ewert J.W., Murray T. L., Lockhart A. B. and Miller C. D. (1993). *Preventing Volcanic Catastrophe. The U. S. International Volcano Disaster Assistance Program: Earthquakes and Volcanoes*. Earthquakes and Volcanoes. Vol. 24. No 6.
- [10] Fadeli A. (1986). *Volcanic earthquakes at Merapi (Central Java) during the lava dome building beginning in October 1986*. Volcanic Seismology. Vol. 3, pages 65-73.

- [11] Jhonson C., Bittendbinder E.A., Boagaert B., Dietz L. and Kohler W. (1995) *A flexible approach to seismic network processing*. IRIS Newsletter. Vol. 14, No. 2, pages 1-4.
- [12] Konstantinou K.I. and Schlindwein V. (2002). *Nature, wavefield properties and source mechanism of volcanic tremor: a review*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Vol. 119, pages 61-187.
- [13] Lermo J., Chávez-García F.J., Huidobro M., Bermúdez M., Rodríguez M., Quass R., Sánchez-Sesma F.J., Nava E., Mijares H., and Briones E. (1995). *Características espectrales de temblores tipo-A, tipo-B y tremores asociados a la erupción del volcán Popocatepetl, México en Diciembre de 1994*. Volcán Popocatepetl. Estudios realizados durante la crisis de 1994-1995. Páginas. 139-166.
- [14] Martínez-Bringas A. (2003). *Variaciones temporales de la atenuación de las ondas coda y del valor b, asociadas a la actividad del volcán Popocatepetl de 1995 a 2003*. Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM.
- [15] McNutt S.R. (1996). *Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of the State-of-the-Art and case histories*. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Scarpa R., Tilling R. I. Ed. Springer, Alemania. Pages 99-146.
- [16] Minakami T. (1974). *Seismology of volcanoes in Japan in L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo and Rapolla(editors)*. Physical Volcanology. Vol. 6, pages 383-403.
- [17] Montalbetti J.F. and Kanasewich E.R. (1970). *Enhancement of teleseismic body phases with a polarization filter*. Geophys. J. R. astr. Soc. Vol 21, pages 119-129.
- [18] Nakamura (1989). *A method of dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface*. Railway Technical Research Institute. Vol. 30. No. 1, pages 25-33.
- [19] Neuberg J., Pointer T. (2000). *Effects of volcano topography on seismic broad-band waveforms*. Geophys. J. Int. 143, pages 239-248.
- [20] Rodríguez-Pérez Q. (2004). *Modelo conceptual de los procesos desarrollados en una etapa eruptiva de 13 horas en el Volcán Popocatepetl mediante el análisis de señales sísmicas del 16 de abril del 2001*. Tesis para obtener el título de ingeniero geofísico. Facultad de ingeniería, UNAM.
- [21] Macías J.L. and Siebe C. (2003). *Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and*

Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field. Boulder, Colorado. Geological Society of America. Vol. 14, No. 2, page 77.

- [22] Valdés C.M. (2004). *Comunicación personal.*
- [23] Wright R., De La Cruz-Reyna S., Harris A., Flynn L. and Gómez-Palacios, J. (2002). *Infrared satellite monitoring at Popocatepetl: Explosions, exhalations and cycles of dome growth.* Journal of Geophysical Research. Vol. 107, pages 1-15.

Apéndice A

Programas desarrollados

A.1. Programa covmatmex.f en FORTRAN 77

```
C*****
C Programa covmatmex.f
C Desarrollado por: Fernando Gomez Santiago
C Las subrutinas jacobinr.f y eigensort.f fueron tomadas del libro
C NUMERICAL RECIPES WITH FORTRAN 77
C Analisis de polarizacion de ondas sismicas
C usando registros sismicos de tres componentes. El metodo
C para calcular los eigenvalores y los eigenvectores es el de rotacion
C de Jacobi.
C Los eigenvectores de salida estan normalizados.
C 28 de Octubre de 2004
C Version 1.0
C Los datos de entrada para calcular la matriz de covarianza son
C seleccionados por el usuario entre los numeros de muestras inicial
C y final.
C Compilar: f77 -o covmatmex covmatmex.f jacobinr.f eigensort.f
C Covmatmex: copia de covmatrix13.f
C*****
      PARAMETER (np=3)
C*****
      REAL cv(1:170000),cn(1:170000),ce(1:170000),deltat,
      *winv(1:170000),winn(1:170000),wine(1:170000),win(170000,3),
      *wint(3,170000),S(3,3),promwinv,promwinn,promwine,totalpromv,
      *totalpromn,totalprome,ro_en,ro_nv,ro_ev,d(np),v(np,np),
      *maxeig,mineig,meaneig,Az1,Az2,Ainc1,Ainc2,tetaincgrad,rect
      *NWIN,t0,VAR
C*****
      CHARACTER*20 comps
C*****
      INTEGER N,Nsamples,nvector,COUNT
C*****
      CALL leeparametros(comps,deltat)
      write(*, 5)
```

```

5   format('#####')
   write(*, 10)comps
10  format('ARCHIVO DE ENTRADA: ',a15)
   write(*, 20)deltat,deltat
20  format('LONG VENTANA DE TIEMPO: ',F9.2,' segundos/',F9.2)
   CALL leedatos(cv,cn,ce,N,comps)
   CALL minmaxdatos(cv,cn,ce,N)
   CALL promdatos(cv,cn,ce,N,totalpromv,totalpromn,totalprome)
   t0=1.0
   t1=deltat
   NWINDOWS=((float(N))-(deltat-2.0))
   COUNT=1
150 if(t0.LT.NWINDOWS)then
   CALL winvector(t0,t1,cv,cn,ce,winv,winn,wine,Nsamples,win)
   write(*, 30)
30  format('MUESTRA INICIAL Y FINAL DE LA VENTANA SELECCIONADA')
   write(*, 40)winv(1),winv(Nsamples)
   write(*, 50)winn(1),winn(Nsamples)
   write(*, 60)wine(1),wine(Nsamples)
40  format('VERTICAL: ',2X,F12.6,2X,F12.6,F12.6)
50  format('NORTE   : ',2X,F12.6,2X,F12.6,F12.6)
60  format('ESTE     : ',2X,F12.6,2X,F12.6,F12.6)
   write(*, 70)
70  format('MINIMO Y MAXIMO DE LA VENTANA DE TIEMPO SELECCIONADA')
   CALL minmaxdatos(winv,winn,wine,Nsamples)
   write(*, 80)
80  format('AMPLITUDES PROMEDIO EN VENTANA DE TIEMPO SELECCIONADA')
   CALL promdatos(winv,winn,wine,Nsamples,promwinv,promwinn,promwine)
   CALL traspmatrix(win,wint,Nsamples)
   CALL multmatrix(win,wint,S,Nsamples,promwinv,promwinn,promwine)
   CALL coefcorr(S,ro_en,ro_nv,ro_ev)
   write(*, 90)
90  format('COEFICIENTES DE CORRELACION')
   write(*, 100)ro_en,ro_nv,ro_ev
100 format('Ro EN: ',F8.5,2X,'Ro NV: ',F8.5,2X,'Ro EV: ',F8.5)
   CALL jacobi(S,np,np,d,v,nrot)
   CALL eigsrt(d,v,np,np)
   CALL maxcovjacobisal(S,d,np)
   CALL calminmax(d,np,maxeig,mineig,meaneig,S,VAR)
   write(*, 110)mineig,meaneig,maxeig
110 format('EIGVALS MIN: ',1X,F10.5,1X,'MEAN: ',F10.5,1X,'MAX: ',F12.5)
   CALL calazimut(v,d,np,maxeig,Az1,Az2,tetadelestegrad,nvector,
*Ainc1,Ainc2,tetaincgrad)
   write(*, 120)Az1,Az2,tetadelestegrad
120 format('Azimut en Grados= ',2X,F10.6,2X,F10.6,2X,F10.6)
   write(*, 130)Ainc1,Ainc2,tetaincgrad
130 format('Ang de Inc en Grados=',2X,F10.6,2X,F10.6,2X,F10.6)
   CALL linearidad(maxeig,meaneig,rect)
   write(*, 140)rect
140 format('Rectilinearidad del movimiento de la particula: ',F13.7)
   CALL salida(t0,t1,cv,cn,ce,Az1,Az2,Ainc1,Ainc2,

```

```

*rect,ro_en,ro_nv,ro_ev)
C*****
t0=t0+1.0
t1=t1+1.0
goto 150
endif
C*****
STOP
END

C*****
C Lee los parametros de entrada: Nombre de los archivos por canal y
C el intervalo de muestreo
SUBROUTINE leeparametros(comps,deltat)
REAL deltat
CHARACTER*20 comps
C Lee archivos de entrada y cuenta el numero de muestras
C write(*,*)'Introduzca los archivos de las componentes'
C write(*,*)'VERTICAL NORTE y ESTE respectivamente'
open(1,file='parampol.txt',status='old')
read(1,10)comps
read(1,20)deltat
10 format(a20)
20 format(F9.5)
close(1)
C*****
RETURN
END

C*****
C Lee los los canales de las tres componentes
SUBROUTINE leedatos(cv,cn,ce,N,comps)
REAL index,cv(1:170000),cn(1:170000),ce(1:170000)
CHARACTER*20 comps
open(1,file=comps,status='old')
i=1
10 read(1,20,END=30,ERR=40)index,cv(i),cn(i),ce(i)
C write(*,20)index,cv(i),cn(i),ce(i)
i=i+1
goto 10
20 format(F12.6,1X,F12.6,1X,F12.6,1X,F12.6)
40 write(*,50)i
50 format('ERROR EN LECTURA DE DATOS EN LA LINEA',2X,I5)
goto 60
30 N=i-1
close(1)
write(*,70)
70 format('Los datos fueron leidos satisfactoriamente.....')
write(*,80)N
80 format('Numero de muestras en los tres archivos SAC XY:',2X,I5)
C*****

```

```

60   RETURN
    END

```

```

C*****
C Termina calculo de amps max y min
  SUBROUTINE minmaxdatos(cv,cn,ce,N)
  REAL cv(1:170000),cn(1:170000),ce(1:170000),mincv,mincn,mince,
  *maxcv,maxcn,maxce
  INTEGER N
C Calcula amps min y max de la traza sismica
  mincv=cv(1)
  mincn=cn(1)
  mince=ce(1)
  maxcv=cv(1)
  maxcn=cn(1)
  maxce=ce(1)
  do 10 i=1,N
    mincv=min(mincv,cv(i))
    mincn=min(mincn,cn(i))
    mince=min(mince,ce(i))
    maxcv=max(maxcv,cv(i))
    maxcn=max(maxcn,cn(i))
    maxce=max(maxce,ce(i))
10   continue
    write(*, 20)
    write(*, 30)mincv,maxcv
    write(*, 40)mincn,maxcn
    write(*, 50)mince,maxce
20   format('COMPONENTE      MINIMO          MAXIMO')
30   format('  V      ',2X,F12.6,3X,F12.6)
40   format('  N      ',2X,F12.6,3X,F12.6)
50   format('  E      ',2X,F12.6,3X,F12.6)
C*****
  RETURN
  END

```

```

C*****
C Calculo del promedio
  SUBROUTINE promdatos(cv,cn,ce,N,promv,promn,prome)
  REAL cv(1:170000),cn(1:170000),ce(1:170000),sumv,sumn,sуме,
  *promv,promn,prome
  sumv=0.
  sumn=0.
  sume=0.
  do 10 i=1,N
    sumv=sumv+cv(i)
    sumn=sumn+cn(i)
    sume=sume+ce(i)
10   continue

```

```

        promv=sumv/float(N)
        promn=sumn/float(N)
        prome=sume/float(N)
        write(*, 20)
20    format('----- AMPLITUDES PROMEDIO-----')
        write(*, 30)promv,promn,prome
30    format('V :',F12.6,' N :',F12.6,' E :',F12.6)
C*****
        RETURN
        END

C*****
C Seleccion de la ventana de tiempo para realizar el analisis de
C polarizacion
        SUBROUTINE winvector(t0,t1,cv,cn,ce,winv,winn,wine,Nsamples,win)
        REAL cv(1:170000),cn(1:170000),ce(1:170000),winv(1:170000)
        *,winn(1:170000),wine(1:170000),win(170000,3)
        INTEGER K,M,Nsamples,a
        K=t0
        M=t1
C        write(*, 20)
20    format('Introduzca Muestra inicial y final respectivamente:')
        write(*, 50)
50    format('#####')
        write(*, 40)K,M
40    format('VENTANA DE TIEMPO A ANALISIS',I5,2X,I5)
C        read(*, *)K,M
        a=1
        do 10 i=K,M
            winv(a)=cv(i)
            winn(a)=cn(i)
            wine(a)=ce(i)
win(a,1)=cv(i)
win(a,2)=cn(i)
win(a,3)=ce(i)
        a=a+1
C        write(*, 30)winv(i),winn(i),wine(i)
10    continue
        Nsamples=a-1
30    format(2X,F12.6,2X,F12.6,F12.6)
C*****
        RETURN
        END

C*****
        SUBROUTINE traspmatrix(X,XT,Nsamples)
        REAL X(170000,3),XT(3,170000)
        do 10 i=1,Nsamples
            do 20 j=1,3
                XT(j, i)=X(i,j)

```

```

20     continue
10     continue
C*****
      RETURN
      END

C*****
C Calculo de la matriz de covarianza
      SUBROUTINE multmatrix(X,XT,S,Nsamples,promwinv,promwinn,promwine)
      REAL X(170000,3),XT(3,170000),prom(3),S(3,3),promwinv,promwinn,
      *promwine
      INTEGER Nsamples
      prom(1)=promwinv
      prom(2)=promwinn
      prom(3)=promwine
      L=Nsamples
      do 10 i=1,3
        do 20 j=1,3
          S(i,j)=0.0
          do 30 index=1,L
            S(i,j)=S(i,j)+((XT(i,index)-prom(i))*(X(index,j)-prom(j)))
30     continue
20     continue
10     continue
      do 40 i=1,3
        do 50 j=1,3
          S(i,j)=S(i,j)/float(Nsamples)
50     continue
40     continue
C*****
      write(*, 60)
60     format('MATRIZ DE COVARIANZA ENTRADA :')
      do 70 i=1,3
        write(*, 80)(S(i,j),j=1,3)
70     continue
80     format(2X,F12.6,2X,F12.6,F12.6)
C*****
      RETURN
      END

C*****
C Calculo de los coeficientes de correlacion
      SUBROUTINE coefcorr(S,ro_en,ro_nv,ro_ev)
      REAL S(3,3),ro_en,ro_nv,ro_ev
      ro_en=((S(2,3)**2.0)/(S(2,2)*S(3,3))
      ro_nv=((S(1,2)**2.0)/(S(1,1)*S(2,2))
      ro_ev=((S(1,3)**2.0)/(S(1,1)*S(3,3))
C*****
      RETURN
      END

```

```

C*****
C Matriz de covarianza salida Jacobi
  SUBROUTINE maxcovjacobisal(S,d,np)
  REAL S(np,np),d(np)
  write(*, 10)
10  format('MATRIZ D SALIDA JACOBI ...LOS EIGEN-VALORES!!!!!!!:')
C    do 20 i=1,np
C      write(*, *) (S(i,j),j=1,np)
C20  continue
    do 30 i=1,np
      write(*, *)d(i)
30  continue
C*****
  RETURN
  END

C*****
C A partir de los eigenvalores del vector D, calcula la linearidad
C del movimiento de la partícula.
  SUBROUTINE calminmax(d,np,maxeig,mineig,meaneig,S,VAR)
  REAL d(np),maxeig,mineig,meaneig,S(3,3),var
C Busca el grado de elipticidad
  mineig=d(1)
  mineig=d(1)
  do 10 i=1,np
    mineig=min(mineig,d(i))
    maxeig=max(maxeig,d(i))
10  continue
  do 20 i=1,np
    if(mineig.LT.d(i).AND.d(i).LT.maxeig)then
      meaneig=d(i)
  VAR=SQRT(S(i,i))
    endif
20  continue
C*****
  RETURN
  END

C*****
C Calculo del azimut y angulo de incidencia.
  SUBROUTINE calazimut(v,d,np,maxeig,Az1,Az2,tetadelestegrad,
*nvector,Ainc1,Ainc2,tetaincgrad)
  REAL d(np),maxeig,ren,tetadelesterad,tetadelestegrad,pi,Az1,Az2,
*v(np,np)
  INTEGER nvector,np
  do 10 i=1,np
    if(d(i).EQ.maxeig)then
      nvector=i
    endif
10  continue

```

```

C Calculo del azimut
  ren= sqrt((v(2,nvector)**2.0+(v(3,nvector)**2.0)
  tetadelesterad=atan(v(2,nvector)/v(3,nvector))
  pi=4.0*atan(1.0)
  tetadelestegrad=tetadelesterad*(180.0/pi)
  Azi=90.0-tetadelestegrad
  Az2=270.0-tetadelestegrad
C Calculo del angulo de incidencia
  rzh= sqrt((v(1,nvector)**2.0+(v(2,nvector)**2.0+
*(v(3,nvector)**2.0)
  tetaincrad=asin((v(1,nvector))/rzh)
  tetaincgrad=tetaincrad*(180.0/pi)
  Ainc1=90.0-tetaincgrad
  Ainc2=270.0-tetaincgrad
C*****
  RETURN
  END

C*****
C Calculo de la linearidad del movimiento de la particula
  SUBROUTINE linearidad(maxeig,meaneig,rect)
  REAL rect,maxeig,mineig,meaneig
C   rect=1.0-(mineig/maxeig)
   rect=1.0-(meaneig/maxeig)
C*****
  RETURN
  END

C*****
C Calculo de la linearidad del movimiento de la particula
  SUBROUTINE salida(t0,t1,cv,cn,ce,Az1,Az2,Ainc1,Ainc2,rect,
*ro_en,ro_nv,ro_ev)
  REAL t0,t1,Az1,Az2,Ainc1,Ainc2,rect,ro_en,ro_nv,ro_ev,
*cv(1:170000),cn(1:170000),ce(1:170000)
  open(1,file='polarizacion.out',status='new')
  write(1, 10)t0,t1,cv(t0),cn(t0),ce(t0),Az1,Ainc1,
*rect,ro_en,ro_nv,ro_ev
10  format(F9.1,1X,F9.1,1X,F12.6,1X,F12.6,1X,F12.6,1X,F10.4,1X,
*F10.4,1X,F10.4,1X,F10.4,1X,F5.3,1X,F8.5,1X,F8.5,F8.5)
  RETURN
  END

```

A.2. Subrutina jacobi.f

```

C TOMADA DEL NUMERICAL RECIPES WITH FORTRAN 77
  SUBROUTINE mjacobi(a,n,np,d,v,nrot)
  INTEGER n,np,nrot,NMAX
  REAL a(np,np),d(np),v(np,np)
  PARAMETER (NMAX=500)

```

```

INTEGER i,ip,iq,j
REAL c,g,h,s,sm,t,tau,theta,tresh,b(NMAX),z(NMAX)
do 12 ip=1,n
  do 11 iq=1,n
    v(ip,iq)=0.
11  continue
    v(ip,ip)=1.
12  continue
  do 13 ip=1,n
    b(ip)=a(ip,ip)
    d(ip)=b(ip)
    z(ip)=0.
13  continue
  nrot=0
  do 24 i=1,50
    sm=0.
    do 15 ip=1,n-1
      do 14 iq=ip+1,n
        sm=sm+abs(a(ip,iq))
14      continue
15      continue
    if(sm.eq.0.)return
    if(i.lt.4)then
      tresh=0.2*sm/n**2
    else
      tresh=0.
    endif
    do 22 ip=1,n-1
      do 21 iq=ip+1,n
        g=100.*abs(a(ip,iq))
        if((i.gt.4).and.(abs(d(ip))+g.eq.abs(d(ip)))
*.and.(abs(d(iq))+g.eq.abs(d(iq))))then
          a(ip,iq)=0.
        else if(abs(a(ip,iq)).gt.tresh)then
          h=d(iq)-d(ip)
          if(abs(h)+g.eq.abs(h))then
            t=a(ip,iq)/h
          else
            theta=0.5*h/a(ip,iq)
            t=1./(abs(theta)+sqrt(1.+theta**2))
            if(theta.lt.0.)t=-t
          endif
          c=1./sqrt(1+t**2)
          s=t*c
          tau=s/(1.+c)
          h=t*a(ip,iq)
          z(ip)=z(ip)-h
          z(iq)=z(iq)+h
          d(ip)=d(ip)-h
          d(iq)=d(iq)+h
          a(ip,iq)=0.

```

```

do 16 j=1,ip-1
  g=a(j,ip)
  h=a(j,iq)
  a(j,ip)=g-s*(h+g*tau)
  a(j,iq)=h+s*(g-h*tau)
16  continue
do 17 j=ip+1,iq-1
  g=a(ip,j)
  h=a(j,iq)
  a(ip,j)=g-s*(h+g*tau)
  a(j,iq)=h+s*(g-h*tau)
17  continue
do 18 j=iq+1,n
  g=a(ip,j)
  h=a(iq,j)
  a(ip,j)=g-s*(h+g*tau)
  a(iq,j)=h+s*(g-h*tau)
18  continue
do 19 j=1,n
  g=v(j,ip)
  h=v(j,iq)
  v(j,ip)=g-s*(h+g*tau)
  v(j,iq)=h+s*(g-h*tau)
19  continue
  nrot=nrot+1
endif
21  continue
22  continue
do 23 ip=1,n
  b(ip)=b(ip)+z(ip)
  d(ip)=b(ip)
  z(ip)=0.
23  continue
24  continue
  pause 'too many iterations in jacobi'
  return
  END

```

A.3. Subrutina eigensort.f

```

C TOMADA DEL NUMERICAL RECIPES WITH FORTRAN 77
  SUBROUTINE eigsrt(d,v,n,np)
  INTEGER n,np
  REAL d(np),v(np,np)
  INTEGER i,j,k
  REAL p
  do 13 i=1,n-1
    k=i
    p=d(i)
  do 11 j=i+1,n

```

```
    if(d(j).ge.p)then
      k=j
      p=d(j)
    endif
11      continue
      if(k.ne.i)then
d(k)=d(i)
d(i)=p
      do 12 j=1,n
        p=v(j,i)
        v(j,i)=v(j,k)
        v(j,k)=p
12      continue
        endif
13      continue
      return
      END
```

Apéndice B

Shell en SAC (Seismic Analysis Code)

B.1. Programa polarizaj.m

Este es un fragmento del shell ejecutable en el software SAC. La estimación de los parámetros de polarización (azimut, linearidad y ángulos de incidencia) son estimados para una ventana de frecuencia de 1 a 1.5 Hz. El cálculo se realiza con las 3 componentes de 1 estación.

```
**COMIENZA ESTACION PPJ BP WIDTH 0.5 HZ
*****
*qdp off
*bd x
*****
*Lectura de los datos en formato SAC
r ppjv.sac ppjn.sac ppje.sac
* filtro pasa-bandas 1-1.5 Hz con 4 polos.
bp n 4 p 2 c 1 1.5
* Conversion a formato ASCII (Esta es la entrada al programa COVMATMEX.F)
w alpha jv1.00-1.50.sac.alpha jn1.00-1.50.sac.alpha je1.00-1.50.sac.alpha
sac2xy.sh jv1.00-1.50.sac.alpha jn1.00-1.50.sac.alpha je1.00-1.50.sac.alpha j1.00-1.50.xy
cp j1.00-1.50.xy filetemp.xy
Ejecucion del programa COVMATMEX.F: Genera un listado que contiene los
parametros de polarizacion.
covmatrix12 > j1.00-1.50.list
mv polarizacion.out j1.00-1.50.polarizacion.out
*****
```