
Identificación de patrones eruptivos en el volcán de Pacaya a través del análisis del ruido sísmico ambiental

Elena Beatríz Rodríguez Taracena



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



**Identificación de patrones eruptivos en el volcán de
Pacaya a través del análisis del ruido sísmico
ambiental**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Elena Beatríz Rodríguez Taracena
para optar al grado académico de Licenciada en Física

Guatemala,
2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



**Identificación de patrones eruptivos en el volcán de
Pacaya a través del análisis del ruido sísmico
ambiental**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Elena Beatríz Rodríguez Taracena
para optar al grado académico de Licenciada en Física

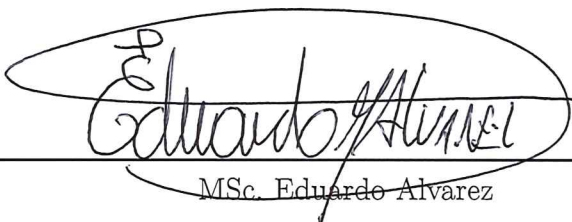
Guatemala,
2025

Vo.Bo.:

(f) 
Dra. Beatriz Cosenza

Tribunal Examinador:

(f) 
Dra. Beatriz Cosenza

(f) 
MSc. Eduardo Alvarez

(f) 
MSc. Irene Aguilar

Fecha de aprobación: Guatemala, 22 de marzo del 2025.

En el presente trabajo de tesis se identificaron distintos patrones de variación de velocidad sísmica relativa mediante el análisis del ruido sísmico ambiental, utilizando el enfoque de estaciones independientes. Estas variaciones pueden correlacionarse con distintas fases de actividad volcánica reportadas por INSIVUMEH.

La identificación de cambios en la velocidad sísmica relativa permite caracterizar el comportamiento del volcán Pacaya y su entorno, así como comprender mejor sus patrones eruptivos. Se espera que este trabajo contribuya a establecer umbrales en las variaciones de la velocidad sísmica relativa que puedan servir como alerta ante el aumento y desarrollo de actividad volcánica. Además, se plantea una alternativa viable de monitoreo utilizando una red de sensores sísmicos poco densa.

Expreso mi mas sincero agradecimiento a:

A Dios, por ser mi guía. Por darme la sabiduría, la fuerza y las oportunidades.

A mis padres, Julio e Isabel, por acompañarme y cuidarme durante los últimos 22 años, por su amor incondicional y por compartir conmigo la emoción de cada uno de mis logros.

A mis hermanas, Sofía y Sara, quienes son mi fuerza e inspiración, y cuya presencia me motiva a seguir adelante cada día.

A mi abuelita Margarita y tía Cristy, por su cariño y por hacerme sentir en casa durante los últimos dos años. A mi abuelita Sonia, por su apoyo a lo largo de mi vida.

A mis compañeros y amigos de la universidad, por todos los momentos compartidos que hicieron de esta etapa un periodo lleno de gratos recuerdos. A mi mejor amigo, Javier, por su apoyo incondicional y estar siempre presente.

A MSc. Eduardo Alvarez por sus enseñanzas y apoyo durante la carrera.

A la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, por creer en mí y en mis sueños y brindarme esta oportunidad. A Karin, Wendy, Eugenia y Mayrita, por ser guías y un apoyo incondicional a lo largo de este trayecto.

A Geoscientists Without Borders y al Dr. Steven Roche, por su interés en la ciencia y por permitirme formar parte de este proyecto. Al Dr. Gregory Waite, por su tiempo y orientación en el análisis de datos presentados en esta investigación.

Al equipo de Geofísica de INSIVUMEH, por abrirme sus puertas para realizar mis prácticas profesionales y por proveer los datos que hicieron posible este trabajo de graduación.

Al Lic. Amílcar Roca, por su invaluable apoyo y guía durante la realización de este proyecto. Le agradezco su paciencia, disposición e interés en mi trabajo.

A mi asesora, Dra. Beatriz Cosenza, por su dedicación, paciencia y generosidad al compartir sus conocimientos conmigo. Sus correcciones y observaciones fueron fundamentales para que este trabajo alcanzara su mejor versión.

Prefacio	IV
Lista de figuras	IX
Lista de cuadros	X
Glosario	XI
Resumen	XIII
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Justificación	4
4. Antecedentes	5
5. Marco teórico	6
5.1. Contexto geológico: Volcán de Pacaya	6
5.2. Sismología volcánica	8
5.2.1. Sismología volcánica en el volcán de Pacaya	9
5.3. Ruido sísmico ambiental	12
5.4. Métodos matemáticos para el análisis de ruido sísmico: Correlación	13
5.4.1. Correlación cruzada	13
5.4.2. Autocorrelación	13
5.5. Interferometría sísmica	13
5.6. Análisis de ruido sísmico con MSNoise	16
5.6.1. Cálculo de funciones de correlación cruzada	17
5.6.2. Apilamiento	17
5.6.3. Estimación de variaciones del tiempo de viaje relativo	17
5.6.4. Variaciones en la velocidad	18

6. Metodología	20
6.1. Identificación de los periodos de actividad durante el 2019-2024	20
6.1.1. Descripción del periodo efusivo y eruptivo 2020-2021	20
6.1.2. Periodos eruptivos a considerar	22
6.2. Datos a utilizar	22
6.3. Procesamiento de las funciones de correlación	23
6.3.1. Preprocesamiento de las señales	24
6.3.2. Procesamiento	25
6.3.3. Apilamiento	28
6.4. Análisis de ventana móvil de espectro cruzado (MWCS) en MSNoise	29
6.5. Cálculo dt/t en MSNoise	31
7. Resultados	33
7.1. Gráficos de las funciones de correlación	33
7.1.1. Gráficos de las funciones de correlación para PCG5	34
7.1.2. Gráficos de las funciones de correlación para PCG2	36
7.1.3. Gráficos de las funciones de correlación para PCG4	39
7.2. Interferogramas	41
7.2.1. Interferogramas para PCG5	41
7.2.2. Interferogramas para PCG2	43
7.2.3. Interferogramas para PCG4	44
7.3. Gráficos de coherencia y desfase temporal relativo	46
7.4. Variaciones de velocidad relativa	51
8. Discusión de resultados	53
9. Conclusiones	55
10. Recomendaciones	56
11. Bibliografía	57
1	57
12. Anexos	62
12.1. Gráficos de funciones de correlación	63
12.1.1. PCG	63
12.1.2. PCG2	65
12.1.3. PCG4	69
12.1.4. PCG5	73
12.1.5. PCG6	77
12.2. Gráficos de espectro cruzado	83
12.2.1. Estación PCG4 componentes NZ	83

Lista de figuras

5.1. Locación del volcán de Pacaya y las comunidades cercanas.	7
5.2. Red de estaciones sísmicas encargadas de monitorear el volcán de Pacaya	12
5.3. Orientaciones tradicionales en los registros sísmicos	12
5.4. Ejemplo de interferometría de ondas. a) Onda plana emitida en x_S , en donde se considera la fuente. b) Respuesta observada en el primer receptor que se encuentra en x_A . c) Respuesta observada en el segundo receptor que se encuentra en x_B . d) Correlación cruzada entre los receptores en x_A y x_B	14
5.5. Ejemplo de la respuesta sísmica a una fuente de ruido $N(t)$ en x_S . (a) Señal registrada en x_A , mostrando la respuesta al ruido. (b) Señal registrada en x_B , evidenciando un patrón similar al de x_A . (c) Función de correlación cruzada entre las señales registradas, resaltando la relación entre ambas estaciones.	15
6.1. Disponibilidad de datos según la estación para los años 2019-2021	23
6.2. Disponibilidad de datos según la estación para los años 2019-2024	23
6.3. Diagrama de flujo para el preprocesamiento de los datos	24
6.4. Diagrama de flujo para el procesamiento de la correlación cruzada, se marcan con azul los pasos que se siguieron en este estudio	27
6.5. Diagrama de flujo para la función de correlación dentro del procesamiento	28
6.6. Diagrama de flujo para la función de la ventana móvil de espectro cruzado (MWCS)	30
7.1. Explicación de un gráfico de funciones de correlación	33
7.2. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NZ (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	35
7.3. Gráfico de funciones de autocorrelación de las componentes EE (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	36
7.4. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NZ (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	37
7.5. Gráfico de funciones de autocorrelación de las componentes EE (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	38
7.6. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NZ (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	39
7.7. Gráfico de funciones de autocorrelación de las componentes EE (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	40

7.8. Interferograma de las componentes cruzadas NZ (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	41
7.9. Interferograma de las componentes EE (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	42
7.10. Interferograma de las componentes cruzadas NZ (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	43
7.11. Interferograma de las componentes cruzadas EE (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	44
7.12. Interferograma de las componentes cruzadas NZ (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	45
7.13. Interferograma de las componentes cruzadas EE (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	46
7.14. Desglose de los gráficos de coherencia y desfase temporal	47
7.15. Gráficos de coherencia media y desfases temporales relativos para PCG5 analizando los componentes EE	48
7.16. Gráficos de coherencia media y desfases temporales relativos para PCG5 analizando los componentes EN	48
7.17. Gráficos de coherencia media y desfases temporales para PCG5 analizando los componentes EZ	49
7.18. Gráficos de coherencia media y desfases temporales para PCG5 analizando los componentes NN	49
7.19. Gráficos de coherencia media y desfases temporales para PCG5 analizando los componentes NZ	50
7.20. Gráficos de coherencia media y desfases temporales para PCG5 analizando los componentes ZZ	50
7.21. Gráficos de variaciones en la velocidad relativa utilizando un promedio de todas las variaciones de componentes de la estación PCG5 utilizando apilamientos de 2, 5 y 10 días	51
12.1. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas ZZ (2021-2024) para la estación PCG utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	64
12.2. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EN (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	65
12.3. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EZ (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	66
12.4. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NN (2021-2024) para la estación PCG utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	67
12.5. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NZ (2021-2024) para la estación PCG utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	68
12.6. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EN (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	69
12.7. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EZ (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	70
12.8. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NN (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	71

12.9. Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas ZZ (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	72
12.10 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EN (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	73
12.11 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EZ (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	74
12.12 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NN (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	75
12.13 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas ZZ (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	76
12.14 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EE (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	77
12.15 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EN (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	78
12.16 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EZ (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	79
12.17 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NN (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	80
12.18 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NZ (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	81
12.19 Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas ZZ (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	82
12.20 Gráfico espectro de las funciones de correlación cruzada de las componentes cruzadas NZ para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz	83

Lista de cuadros

5.1. Lista de estaciones en el volcán de Pacaya	11
6.1. Tipos de actividad 2020-2021	20
6.2. Periodos principales de actividad definidos para este trabajo	22
6.3. Lista de estaciones utilizadas en el análisis	22
6.4. Parámetros de configuración para el preprocesamiento de las señales	25
6.5. Banda de frecuencia según el filtro utilizado	25
6.6. Parámetros de configuración para el procesamiento de las funciones de correlación	26
6.7. Funciones de referencia	29
6.8. Banda de frecuencia para MWCS según el filtro utilizado	29
6.9. Parámetros de configuración para el cálculo de desfases temporales	32

Actividad volcánica efusiva: emisión de lava de forma continua y relativamente tranquila, sin explosiones significativas.

Actividad volcánica eruptiva: liberación explosiva de gases, ceniza y material volcánico, con posibles flujos piroclásticos.

Autocorrelación: correlación de una señal con ella misma.

Correlación cruzada: correlación de dos señales.

Correlación: operación matemática que permite cuantificar la similitud entre dos señales.

Flujos piroclásticos: mezclas densas y rápidas de gases, ceniza y fragmentos de roca caliente que descienden por las laderas del volcán a gran velocidad.

Interferometría sísmica pasiva: técnica que utiliza la correlación para transformar mediciones sísmicas pasivas en respuestas determinísticas.

Ondas de cuerpo: ondas sísmicas que viajan por el interior de la Tierra. Son más rápidas y de mayor frecuencia, observándose primero en el sismograma.

Ondas superficiales: ondas sísmicas que se propagan por la superficie de la Tierra, más lentas y de menor frecuencia que las ondas de cuerpo. Son más fuertes en sismos superficiales y se debilitan con la profundidad.

Ondeleta: oscilación ondulatoria con una amplitud que comienza en cero, aumenta o disminuye y luego vuelve a cero una o más veces.

Ruido sísmico ambiental: ondas sísmicas generadas por fuentes tanto humanas como naturales, las cuales no presentan una señal clara y fácilmente identificable.

Este estudio preliminar explora el uso del ruido sísmico ambiental para el monitoreo del volcán Pacaya en Guatemala. Forma parte de la iniciativa *Increasing Natural Hazard Resiliency in Guatemala* de *Geoscientists Without Borders* (GWB) en colaboración con el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

Se busca comprender y evaluar la técnica de autocorrelación del ruido sísmico ambiental para su futura implementación en los observatorios volcánicos, permitiendo un monitoreo continuo sin la necesidad de una red densa de sismómetros. Para ello, se analizan patrones de cambio en la velocidad sísmica relativa antes, durante y después de un periodo de actividad volcánica. El estudio se basa en datos de cinco estaciones sísmicas, las cuales estuvieron activas en distintos momentos entre 2019 y 2024.

Se implementó la técnica de Interferometría Sísmica Pasiva, obteniendo y graficando funciones de autocorrelación de las distintas componentes de cada estación (EE, EN, EZ, NN, NZ, ZZ), las cuales se apilan linealmente cada 2, 5 y 10 días. Estas gráficas se utilizaron para determinar los momentos en los que cada estación percibió mayores correlaciones en distintos tiempos de retardo, indicando cambios en la actividad volcánica. Se exploró el uso de distintas bandas de frecuencia para el análisis de autocorrelación, realizando el procedimiento con frecuencias de (0.7 - 1.5) Hz, (1.5 - 4.0) Hz y (4.0 - 8.0) Hz.

Se analizaron los gráficos para cada estación utilizando las distintas combinaciones de componentes para las tres bandas de frecuencia. Se seleccionó la estación PCG5 porque era la única que estación operando durante en las etapas pre-eruptiva, eruptiva y post-eruptiva. Además, se seleccionó la banda de frecuencia de 1.5 Hz a 4.0 Hz, ya que ofrece las correlaciones más claras entre la actividad del volcán de Pacaya y sus patrones de variación sísmica.

Se utilizó la técnica de análisis de espectro cruzada de ventana móvil (MWCS) para estimar desfases temporales relativos. Para esto se compara la señal en análisis con una señal de referencia previamente establecida, obteniendo valores de coherencia media. Por la cantidad de datos a analizar se utilizaron dos funciones de referencia: diciembre 2019 para los datos de 2019 a 2021 y noviembre 2022 para los datos de 2022 a 2024. Con los retardos temporales relativos se determinan los cambios en la velocidad sísmica relativa utilizando una relación directa entre ambas cantidades. Se presentan los cambios en la velocidad sísmica relativa utilizando los apilamientos de 2, 5 y 10 días, siendo los últimos dos óptimos para la observación de las variaciones en la velocidad sísmica relativa que pueden deberse a modificaciones en las propiedades del medio del volcán de Pacaya, y que pueden asociarse con distintas etapas de actividad.

Se identificaron distintos patrones de variación de velocidad. El periodo eruptivo principal se

caracterizó por el aumento en las variaciones sísmicas relativas, con valores positivos cercanos a 0.50% y valores máximos de 0.75%. En el periodo post eruptivo presentó un descenso considerable en su etapa inicial, alcanzando valores de -1.0%. El resto de este periodo presenta cambios en la velocidad sísmica relativa de amplitud mucho menor, manteniéndose en valores negativos cercanos a -0.25%.

La interferometría sísmica pasiva utilizando el enfoque de la autocorrelación de las mismas componentes y componentes cruzadas en estaciones independientes, demostró ser un método viable para el volcán de Pacaya.

Sin embargo, se recomienda incluir más de una estación para poder realizar una comparación de las variaciones obtenidas y a su vez complementar con las correlaciones cruzadas. Se recomienda evaluar el uso de un apilamiento con un paso de un día para observar cambios más suaves durante el análisis de las coherencias medias y las variaciones en la velocidad sísmica relativa.

La eficiencia del monitoreo volcánico depende de la detección y comprensión de los pequeños cambios que se producen en el edificio volcánico mucho antes de que comience el transporte de magma durante los episodios volcánicos activos (De Plaen et al., 2016). Por ejemplo, antes, durante y después de las explosiones volcánicas se producen una gran cantidad de señales sísmicas que ayudan a comprender la dinámica de la erupción.

Una técnica moderna de monitoreo consiste en el análisis continuo del ruido sísmico ambiental por medio de interferometría sísmica pasiva, la cual ha demostrado ser efectiva para la detección continua de pequeños cambios temporales de las velocidades sísmicas ($\sim 0.1\%$) del medio. Varios estudios realizados con ruido sísmico ambiental han demostrado que las pequeñas perturbaciones dentro de un edificio volcánico pueden detectarse como cambios en las propiedades de las ondas sísmicas.

Normalmente, en la interferometría sísmica pasiva se analizan registros sísmicos provenientes de varias estaciones por medio de correlación cruzada. Sin embargo, en los últimos años se ha comenzado a implementar el monitoreo con estaciones independientes mediante el uso de autocorrelación (De Plaen et al., 2016; Gonzalez-Santana et al., 2024), ofreciendo una alternativa fiable al enfoque clásico de correlación cruzada a la hora de medir variaciones en la velocidad sísmica. La técnica de estaciones independientes ofrece ventajas como no necesitar de una red densa de sensores sísmicos, además del ahorro de recursos computacionales ya que al utilizar el mismo sensor no se requiere de procesos adicionales para mantener la calidad de la señal.

En este trabajo de graduación se determinan cambios en la velocidad sísmica relativa del medio del volcán de Pacaya durante el periodo eruptivo del año 2021. Para esto se explora la técnica de interferometría sísmica pasiva utilizando estaciones independientes y sus componentes (E,N,V). Se utilizan casi seis años de datos provenientes de sensores sísmicos instalados por INSIVUMEH. Los sensores estuvieron activos durante distintos momentos y son de diversos tipos, incluyendo sensores de periodo corto, banda ancha y banda muy ancha.

Para realizar el análisis se utiliza el software MsNoise desarrollado por Thomas Lecocq y Co-rentin Caudron en 2014. Para identificar las variaciones en la velocidad relativa, se realizan cuatro pasos principales. Se calculan las funciones de correlación para las distintas combinaciones de las componentes (E,N,V). Los datos se preprocesan utilizando el método de *winsorizing* con un valor de tres veces el RMS de la traza analizada. Además, se procesan utilizando tres bandas de frecuencias (0.7-1.5 Hz, 1.5-4.0 Hz y 4.0-8.0 Hz). Las funciones de correlación se apilan linealmente cada 2, 5

y 10 días. Luego se utiliza el análisis de espectro cruzado de ventana móvil para determinar los desfases temporales relativos y las coherencias medias entre las funciones de correlación actuales y la de referencia. Finalmente, con los desfases temporales relativos se determinan las variaciones en la velocidad relativa del medio. Estas se grafican según los días de apilamiento. Al correlacionar las variaciones en la velocidad sísmica relativa con los diferentes periodos de actividad reportados por INSIVUMEH, se busca establecer valores de referencia que puedan indicar el inicio o desarrollo de un periodo eruptivo. Además, este estudio representa un primer paso para la implementación de la interferometría sísmica pasiva con estaciones independientes como un método viable para el monitoreo volcánico diario en el país.

2.1. Objetivo general

Caracterizar las fases eruptivas del volcán de Pacaya durante el período 2019-2024, por medio del análisis de ruido sísmico ambiental, implementando una metodología que permita el monitoreo inmediato y práctico de señales sísmicas en regiones volcánicas.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar los periodos de actividad mediante la lectura de los boletines especiales de INSIVUMEH (2019-2024).
- Implementar el software MsNoise para el preprocesamiento y procesamiento de correlación de las señales sísmicas.
- Calcular las funciones de correlación y consultar por cambios en los patrones de correlación en los gráficos de las funciones.
- Determinar las variaciones en la velocidad relativa utilizando el método de Espectro cruzado de ventana móvil (MWCS).
- Correlacionar las variaciones de velocidad relativa con periodos de actividad reportados por INSIVUMEH.

El volcán de Pacaya se encuentra dentro del grupo de volcanes de amenaza muy alta, siendo el tercero más peligroso en Guatemala (Roca et al., 2021). Desde su reactivación en 1962, el volcán de Pacaya ha tenido de 2 a 3 explosiones estrombolianas por año (INSIVUMEH, 2010), y las principales amenazas que presenta incluyen flujos de lava, caída de tefra y ceniza, así como la expulsión de bloques balísticos. En menor medida, también pueden ocurrir flujos piroclásticos y avalanchas de escombros.

Actualmente, nueve comunidades cercanas al volcán albergan aproximadamente 15 mil personas, de las cuales 9 mil residen a menos de 5 kilómetros del cráter activo (Wardman et al., 2012). Además, cerca de 2 millones de personas viven en un radio de 40 kilómetros de los volcanes Pacaya, Fuego y Santiaguito (Roca et al., 2021).

El periodo eruptivo más violento del volcán de Pacaya de los últimos 50 años ocurrió en mayo de 2010, causando daños en todo el país. En las comunidades aledañas se realizaron más de 3000 evacuaciones, provocó el daño y pérdida de cientos de viviendas, decenas de heridos y la muerte de dos personas (Wardman et al., 2012). La dispersión de ceniza del volcán alcanzó los 300 kilómetros hacia el norte, afectando municipios aledaños y provocando el cierre del aeropuerto internacional La Aurora durante 6 días (INSIVUMEH, 2010).

La preparación de las poblaciones y su capacidad de respuesta ante la amenaza de futuros eventos volcánicos, requieren caracterizar el comportamiento del volcán y sus alrededores. Para ello, es necesario entender mejor sus patrones eruptivos, así como mejorar las estrategias de monitoreo.

Este trabajo busca mejorar el monitoreo volcánico al evaluar la viabilidad de la interferometría sísmica pasiva como una herramienta para la vigilancia continua en el país, especialmente en escenarios con una cantidad limitada de sensores de distintos tipos. El análisis de las variaciones en la velocidad sísmica ambiental y su relación con los periodos de actividad volcánica permitirá establecer bases para la detección de cambios en el sistema volcánico antes, durante y después de un periodo eruptivo.

Dada la constante actividad y alta peligrosidad del volcán de Pacaya, se han realizado diversos estudios en los cuales se aplican técnicas de análisis de ruido sísmico ambiental para caracterizar su dinámica y la de sus alrededores.

Un ejemplo es el estudio realizado por [Puel \(2017\)](#), en el cual comparó diferentes métodos de análisis del ruido sísmico ambiental con el fin de estimar curvas de dispersión fiables para crear una tomografía 3D de ondas superficiales del volcán de Pacaya.

También se encuentra el trabajo realizado por [Roca \(2018\)](#), el cual es un precursor del presente estudio, quien utilizó la técnica de correlación entre señales de tres estaciones de periodo corto para determinar pequeñas perturbaciones en la velocidad relativa. Como resultado, halló cambios relativos en la velocidad del medio que coincidieron con una fuerte etapa de degasificación, flujos de magma e inflación del cráter.

Más recientemente [Gonzalez-Santana et al. \(2024\)](#) realizaron análisis de correlación de ruido sísmico ambiental de cuatro estaciones sísmicas, como parte de una evaluación geofísica más amplia del periodo eruptivo de 2015-2021. Sin embargo, sus resultados tuvieron poca definición en los cambios relativos de la velocidad sísmica debido a contaminación de señales continuas de tremor.

Este trabajo pretende construir sobre la base de estos estudios previos y contribuir a la evaluación de la técnica de análisis de ruido sísmico ambiental para la detección de cambios en las velocidades relativas del medio volcánico en Pacaya, de modo que pueda eventualmente ser utilizada como herramienta de monitoreo.

5.1. Contexto geológico: Volcán de Pacaya

El volcán Pacaya es parte de la cadena cuaternaria volcánica de Centroamérica, la cual tectónicamente se formó por la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe. El volcán de Pacaya tiene una elevación máxima de 2552 m.s.n.m y está localizado al sur del Lago de Amatitlán, a 30 kilómetros de la Ciudad de Guatemala. Tiene estructura de volcán compuesto o estrato volcán, una actividad explosiva de tipo estromboliano y material eruptivo basáltico (INSIVUMEH 2024). Los estrato volcanes se caracterizan por sus lados empinados, con cráteres simétricos compuestos de capas entrelazadas de ceniza volcánica y material de flujos de lava y piroclástico (Tilling 1996). La actividad estromboliana se caracteriza por su baja intensidad y larga duración, con explosiones recurrentes, breves y de frecuencia e intensidad variables (Taddeucci et al. 2015). La actividad del volcán de Pacaya se distingue por la efusión de flujos de lava, la emisión de columnas de gas y la expulsión de piroclastos, los cuales se depositan en las cercanías del cráter (INSIVUMEH 2024).

El volcán Pacaya reanudó su actividad en el año 1961, luego de 200 años de inactividad y ha estado en constante actividad desde 1965 (Bardintzeff y Deniel 1992).

El volcán de Pacaya pertenece al complejo vulcanológico Pacaya, el cual tiene al menos seis conos: Cerro Chino, Cerro Grande, Cerro Chiquito, Pacaya Viejo, Pacaya y Cerro Mackenney (Figura 5.1), siendo el último el cono activo en la actualidad (Rose et al. 2011).

Eggers (1971) describe tres fases explosivas principales para la creación del complejo Pacaya:

1. Fase 1: se caracteriza por ser un periodo de vulcanismo andesítico en el que creció el cono ancestral, esta fase culminó con erupciones de piedras pómez provocando el colapso del cono, formando la caldera volcánica de la Laguna Calderas
2. Fase 2: ocurrieron grandes erupciones de pómez dacita y culminó con la erupción de domos de riodacita, dacita y latita-andesita. En estos domos se encuentran Cerro Grande y Cerro Chiquito.
3. Fase 3: se caracteriza por la erupción de basaltos olivínicos y por el crecimiento y destrucción de cráteres compuestos y de ceniza. Se divide en las subfases inicial, histórica y moderna:

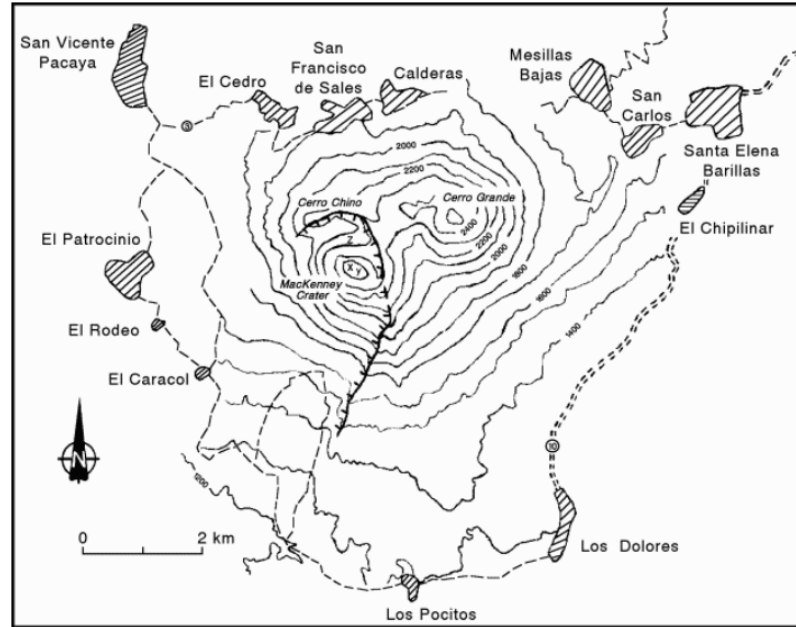


Figura 5.1: Locación del volcán de Pacaya y las comunidades cercanas. Tomada de [Smithsonian Institute Global Volcanism Program \(1995\)](#).

- *Volcanismo inicial*: ocurrieron erupciones iniciales en el área de la Laguna Calderas. Estuvo marcada por el crecimiento de un cono inicial que cubría gran parte del oeste de Cerro Grande. Esta subfase termina con el colapso de este cono.
- *Volcanismo histórico*: durante las erupciones de esta subfase se formaron Cerro Chino y el volcán de Pacaya debido a flujos basálticos y piroclásticos. Fueron predominantes las explosiones de ceniza y flujos de lava ocasionales. La última explosión durante esta subfase fue en 1880.
- *Volcanismo moderno*: luego de 80 años de inactividad, en el flanco de Las Cachajinas, el volcán de Pacaya tuvo un periodo eruptivo de marzo a abril de 1961. En 1965, lava incandescente apareció por primera vez en el cráter de la fosa, desde ese momento hasta la actualidad, el volcán ha tenido actividad continua, restringida al área del cráter de la fosa, en donde creció un cráter anidado de tefra de lava, este fue denominado cráter Mackenney. Según [Rose et al. \(2011\)](#) la actividad de 1961 a 2010 puede interpretarse como la primera parte de un episodio inmaduro eruptivo de un estratovolcán. Hay periodos de actividad eruptiva que produce la caída de piroclastos. También es recurrente la actividad efusiva, con erupciones de lava provenientes de respiraderos del flanco y de respiraderos cerca del cráter. Sin embargo, las erupciones del flanco tienen un volumen mucho mayor y son menos comunes. Todo este material ha contribuido a la formación de un rasgo cónico asimétrico, siendo predominante en el flanco oeste.

De acuerdo con el [INSIVUMEH \(2010\)](#) del año 1962 al 2000, el volcán de Pacaya presentó de dos a tres erupciones estrombolianas por año.

Uno de los principales periodos de actividad ocurrió durante los años 2006 a 2010. El 27 y 28 de mayo del 2010 se registró una de las erupciones más violentas de la década, siendo de tipo paroxismal, las cuales según [Zobin \(2018\)](#) son violentas y se consideran la etapa más peligrosa y tensa del ciclo eruptivo. Durante la fase más violenta de la explosión se generaron dos fuentes incandescentes con una altura de 2000 metros sobre el cráter, ocasionando el colapso de la pared oeste del cráter Mackenney y una avalancha de escombros que generó una abertura dirigiendo los flujos piroclásticos hacia aldeas y caseríos que se encuentran en los flancos oeste y noroeste. Las más afectadas fueron: San

Francisco de Sales, Calderas, El Cedro y Mesías Altas y Bajas, donde se encontró material balístico y bombas de 10 a 15 centímetros de diámetro (Figura 5.1). La caída de ceniza fue una de las principales amenazas de esta explosión. En las aldeas aledañas esta alcanzó espesores de 10 a 20 centímetros, ocasionando el colapso de los techos del 95 % de las viviendas. La ceniza fue dispersada 300 kilómetros hacia el norte del volcán, afectando la Ciudad Capital, Amatitlán, Villa Canales, Villa Nueva, Boca del Monte y San Miguel Petapa. La dispersión de ceniza alcanzó los municipios de Cobán en Alta Verapaz, Puerto Barrios en Izabal, y parte de Petén. La actividad efusiva estuvo presente en el flanco este, con un flujo de lava que alcanzó los 5 kilómetros de longitud y se dispersó en los terrenos llanos de la zona (INSIVUMEH, 2010).

El presente trabajo de graduación se centra en el periodo de actividad que comenzó en 2015 y concluyó en 2021, en donde la actividad fue predominante durante abril del 2020 a mayo del 2021. Durante este periodo prevalecieron grandes flujos de lava, especialmente en el flanco suroeste y sur, alcanzando longitudes de 4000 metros. Las explosiones de tipo stromboliano moderadas a fuertes fueron constantes, así como columnas de desgasificación y periodos de construcción y destrucción del cráter.

5.2. Sismología volcánica

De acuerdo con Zobin (2014), la sismología volcánica es la ciencia que estudia las señales sísmicas que se originan en los volcanes y están asociadas a la actividad volcánica. Las fuentes sísmicas en los volcanes implican el movimiento dinámico de gases, fluidos y sólidos, además de que los caminos de propagación son heterogéneos, anisotrópicos y absorbentes, con topografías irregulares.

Minakami (1960) propuso una clasificación de los terremotos volcánicos basada en la locación de sus focos, su relación con las erupciones y la naturaleza del movimiento sísmico. Minakami (1960) dividió los terremotos volcánicos en 4 tipos: profundos (tipo A), superficiales (tipo B), tremor volcánico y terremotos de explosión.

Zobin (2014) identifica los procesos geológicos que producen señales sísmicas asociadas a la actividad volcánica que están relacionadas con el proceso de erupción. Entre ellas se encuentran las señales generadas por la migración del magma dentro de la corteza terrestre, las señales que se generan dentro de los conductos volcánicos y las señales que se generan durante las manifestaciones superficiales de la actividad volcánica. Por ejemplo, la generación de la actividad sísmica volcánica se ve afectada por la velocidad de ascenso del magma desde su zona de almacenamiento en la corteza, la cual depende de la presión en la zona de almacenamiento del magma, la densidad y viscosidad del magma, el diámetro del conducto, y la resistencia al flujo en el conducto que conecta la zona de almacenamiento del magma con la superficie (Rutherford, 2008). Cuando el magma asciende de la corteza superior dentro de los conductos volcánicos, pasa por un proceso de exsolución y fragmentación. Durante este tipo de actividad, el magma se transporta en trayectorias geométricamente complejas, por lo que en las señales sísmicas reflejan las interacciones dinámicas entre gases, líquidos y sólidos. También se deben considerar las señales provocadas por la fracturación de la roca del domo de lava, así como los flujos piroclásticos, desprendimiento de rocas y los lahares.

Wassermann (2012) clasifica las señales sísmicas entre transitorias y continuas, incluso si estas están generadas por la superposición de señales discretas.

Señales sísmicas de origen volcánico transitorias

- *Eventos volcano-tectónicos (VT)*: el movimiento de magma a través de conductos hacia la superficie genera fracturas que producen terremotos volcanotectónicos, los cuales ocurren dentro y alrededor del edificio volcánico y corresponden a eventos de tipo A y B de la clasificación

de Minakami. Los terremotos volcanotectónicos reflejan la interacción entre la migración del magma hacia la superficie terrestre y la actividad tectónica de la corteza (Zobin, 2014). Estos suelen ocurrir semanas antes de un periodo eruptivo con construcción de domo (Zobin, 2017b) y se caracterizan por la llegada clara de ondas S y P, con frecuencias entre 5Hz y 20Hz (Zobin, 2017e).

- *Eventos de periodo largo (LP) y periodo muy largo (VLP)*: este tipo de señales no se asocian con un evento eruptivo en particular pero son comunes dentro de la actividad volcánica. Los eventos LP se caracterizan por ser armónicos con periodos de 0.2 s - 2 s y frecuencias de 5 Hz y 0.5 Hz; y los eventos VLP por tener periodos de 2s a 100 s y frecuencias de 0.5 Hz a 0.01 Hz (Zobin, 2017d). Se caracterizan solo por la llegada de ondas P y no se observa una onda S.
- *Eventos híbridos*: estas son las señales que comparten características de eventos VT y LP, y suelen reflejar una mezcla de los mecanismos de origen de ambos. Los eventos híbridos se asocian con el crecimiento del domo (Wassermann, 2012).
- *Eventos explosivos*: el tipo de señales dependerá del tipo de explosión. Dado que el volcán de Pacaya tiene actividad de tipo estromboliano, se considera que estas señales son cortas, entre segundos a minutos. Suelen tener dos fases: la fase inicial, de frecuencia baja, y una fase principal con un aumento repentino en la frecuencia. Estos pueden ocurrir como eventos únicos o como una secuencia (Zobin, 2017c).

Señales sísmicas de origen volcánico continuas

- *Tremor volcánico (TR)*: es el registro continuo de vibraciones armónicas o no armónicas que pueden prolongarse durante minutos o meses, y que pueden ocurrir antes y después de la explosión. En los espectros de frecuencia se observa como picos agudos en la banda 0.1-7.0 Hz (Konstantinou y Schlindwein, 2003). Las señales sísmicas del tremor volcánico de un periodo corto o de toda la erupción pueden utilizarse para obtener información del proceso eruptivo (Zobin, 2014). Para volcanes con magma de baja viscosidad, como el volcán de Pacaya, se ha observado que la interacción entre gases y fluidos magmáticos en los conductos genera tremor volcánico (Wassermann, 2012). Analizar y entender las fuentes que generan el tremor volcánico se considera una tarea compleja, ya que existen gran número de mecanismos candidatos y de combinaciones entre ellos y, además, la profundidad de la fuente puede variar entre cientos de metros a kilómetros (Konstantinou y Schlindwein, 2003). El tremor volcánico, en su mayoría, tiene un campo de ondas comprendido por ondas Rayleigh y Love (superficiales), sin embargo, también se ha observado un campo de ondas con presencia de ondas de cuerpo y superficiales (Zobin, 2017a).
- *Señales sísmicas asociadas a flujos piroclásticos y caída de rocas*: se les conoce como “terremotos de caída y flujo” ya que estas señales se originan por la caída y flujo de material incandescente proveniente de los domos de lava y flujos de lava, así como del desprendimiento de rocas. Este tipo de señales son la principal componente de sismicidad durante la construcción y destrucción del domo (Zobin, 2003). La duración de estas señales provenientes de estaciones de periodo corto se utiliza para clasificar los eventos de la siguiente manera: magnitud 1, cuando son menores a 100 s; magnitud 2, para eventos entre 100 s y 250 s; y magnitud 3, para aquellos entre 250 s y 450 s. Los eventos de magnitud 1 corresponden a desprendimientos de rocas, mientras que los de magnitud 2 y 3 incluyen flujos piroclásticos y grandes desprendimientos de rocas. Estas señales sísmicas tienen amplitudes entre 1-10 Hz (Zobin, 2017b).

5.2.1. Sismología volcánica en el volcán de Pacaya

Varios autores han realizado estudios sísmicos en el volcán de Pacaya para comprender su dinámica.

Lanza et al. (2016) elaboraron un modelo de velocidad cercana a la superficie del volcán mediante el análisis de tremor sísmico, utilizando una red de 11 sensores de periodo corto durante dos semanas en enero de 2011. Se utilizó el método autocorrelación espacial (SPAC) y se calcularon las curvas de dispersión de Rayleigh y Love en la ubicación de la red de sensores para luego invertirlas y así producir el modelo de velocidad. El método SPAC utiliza la correlación cruzada de ruido sísmico ambiental entre pares de estaciones a una distancia fija para determinar velocidades de fase. Las velocidades de fase derivadas apuntan a un campo de ondas compuesto principalmente por ondas superficiales. Obtuvieron un rango de velocidades de las ondas S en el volcán de Pacaya de 0.2–0.7 km/s en la superficie y 1.3–2.3 km/s en profundidades mayores que 200–400 metros.

Guettinger (2016) utilizó modelos de atenuación sísmica para investigar la estructura del cono, a partir de dos semanas de datos de 19 sensores de periodo corto a una distancia de 1.5 km del cráter. Las señales analizadas fueron principalmente tremor y eventos discretos asociados con procesos de desgasificación. Se obtuvo una mayor atenuación en las estaciones colocadas en el norte del volcán, resultado de fracturas de conductos y generación de magma. Las estaciones en el flanco oeste presentaron una menor atenuación, resultado de causas estructurales.

Puel (2017) comparó métodos de análisis de ruido sísmico ambiental para estimar curvas de dispersión fiables con el fin de crear una tomografía 3D de ondas superficiales del volcán Pacaya, utilizando 8 días de datos de 19 sismómetros de periodo corto. Indica que se necesitan varios días de datos para poder realizar un análisis de correlación cruzada del ruido ambiental dado que esto aumenta la razón Señal-Ruido (SNR). Principalmente comparó dos métodos: 1) El método propuesto por Bensen et al. (2007) utilizando Análisis Frecuencia Tiempo (FTAN), en el que se calculan las funciones de Green de ondas Rayleigh estimadas a partir del ruido sísmico ambiental. 2) El método SPAC y otras técnicas derivadas de este. Con el método SPAC se realiza la correlación cruzada en el dominio del tiempo y la función de correlación obtenida puede verse como una función de Bessel cuyo argumento es la razón entre la frecuencia angular por la distancia y la velocidad de fase. Puel determinó que el método SPAC es preferible al analizar pocos días de datos ya que el método FTAN necesita de al menos 1 mes de datos y las distancias entre estaciones deben ser mayores a dos longitudes de onda. Se determinaron altas velocidades de fase para las ondas Rayleigh, así como indicios de la presencia de ondas de cuerpo dentro de las ondas superficiales.

Lanza y Waite (2018) investigaron el mecanismo de origen y la geometría de eventos LP, por medio del análisis de miles de eventos pequeños y repetitivos que están asociados con explosiones estrombolianas débiles en el respiradero de la cumbre del volcán de Pacaya, registrados en 4 estaciones durante octubre-noviembre de 2013. En el estudio se indica que las señales registradas en el volcán de Pacaya están dominadas por señales de tremor volcánico, pero que en muchas ocasiones este está compuesto en parte por muchos eventos pequeños poco espaciados en el tiempo. Identificando eventos discretos se generó un evento LP representativo por medio de la inversión de onda completa. Dada la poca cantidad de estaciones utilizadas e incertidumbre en el modelo de velocidad no se logró determinar con certeza el origen de la fuente. Sin embargo, se determinó que los eventos LP involucran un cambio en el volumen en la fuente y, además, reflejan un mecanismo de tipo grieta poco profunda muy probablemente relacionado con eventos de estallido de burbujas en la cumbre.

Roca (2018) realizó un estudio de ruido sísmico ambiental para la medición de pequeñas perturbaciones de velocidad sísmica en el volcán de Pacaya, utilizando aproximadamente 10 meses de datos de tres estaciones de periodo corto. Obtuvo las funciones de correlación cruzada y autocorrelación para identificar variabilidad en la coherencia de las señales sísmicas. Se identificaron cambios relativos en la velocidad del medio correspondientes a una fuerte etapa de desgasificación, flujos de magma e inflación del cráter. Se determinó que normalmente la velocidad relativa se estabiliza en valores en torno al 0.05%. Antes de una explosión volcánica los valores de la velocidad relativa disminuyen alcanzando valores de 1.5%. Para flujos de magma e inflación del cráter las perturbaciones se encontraron en un 0.05% y 0.1%.

DeVlieg (2023) realizó un análisis de señales sísmicas del volcán de Pacaya mediante la detección

de eventos con Deep Learning. Se propone el uso de este algoritmo para la elección de eventos pequeños, dado que las técnicas tradicionales son imprecisas en las cercanías del volcán de Pacaya, dado que es un ambiente ruidoso y los pequeños eventos producidos por el volcán pueden mezclarse con el ruido ambiental. La profundidad de los eventos osciló entre 2,5 km (cumbre de Pacaya) a 0 km (nivel del mar). Se determinó muy bajas velocidades para las ondas P y S demostrando la escasa consolidación del cono Mackenney.

Recientemente, [Gonzalez-Santana et al. \(2024\)](#) realizaron una evaluación geofísica del periodo eruptivo de 2015-2021, analizando datos satelitales de radar, mapas de flujos de lava y datos sísmicos de 4 estaciones. En la parte del estudio en que aplicaron sismología volcánica, utilizaron dos métodos: Mediciones de Amplitud Sísmica en tiempo Real (RSAM) y correlaciones cruzadas de ruido ambiental. Dentro de los resultados se advierte poca definición en cambios en la velocidad sísmica por contaminación de señales continuas de tremor. Se sugiere que las estaciones para el análisis de ruido sísmico ambiental se encuentren cerca de la cumbre para experimentar más cambios en el subsuelo debido a procesos magmáticos bajo el edificio y los respiraderos observados. Dado que los cambios en la velocidad sísmica pueden rastrear cambios en las precipitaciones, se realizó una comparación entre una serie temporal de datos de precipitaciones y las variaciones de velocidad, sin embargo, no se encontraron correlaciones considerables entre ambos.

Monitoreo sísmico del volcán de Pacaya

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH, es la institución encargada del monitoreo del volcán de Pacaya. Durante 2019-2024, el volcán ha contado con una red de 5 sensores sísmicos [Tabla 5.1](#) y [Figura 5.2](#). Los sensores sísmicos emplean el formato SEED (*Standard for the Exchange of Earthquake Data*) para sus registros, utilizando un formato de tres letras para nombrar los canales de registro del instrumento. La primera letra (de izquierda a derecha) especifica la banda de respuesta del instrumento, en donde (S) corresponde a un sensor de Periodo Corto, (B) a un sensor de Banda ancha y (H) una estación de Banda Ancha Alta. S y B muestrean las frecuencias en el mismo rango, ≥ 10 a < 80 , y se diferencian en que S tiene un periodo de corte menor que B. H muestrea las frecuencias en un rango de ≥ 80 a < 250 . La siguiente letra especifica el código del instrumento, siendo (H) para los sensores de Ganancia Alta. La tercera letra pertenece al código de orientación, indicando la orientación de la señal o los canales disponibles. Existen tres orientaciones tradicionales en los registros sísmicos: Norte-Sur (N), Este-Oeste (E) y Vertical (Z), lo que significa que se obtiene información del movimiento del suelo en esas tres direcciones. [\(IRIS, 2012\)](#). La dirección de cada de las componentes de los sensores puede encontrarse en la [Figura 5.3](#).

Estación	Nombre	Respuesta del instrumento	Código del instrumento	Código de orientación	Distancia desde el cráter Mackenney (m)
1	PCG	S	H	Z	1300
2	PCG2	S	H	E,N,Z	3300
3	PCG4	B	H	E,N,Z	4500
4	PCG5	S,B	H	E,N,Z	3700
6	PCG6	H	H	E,N,Z	3100

Tabla 5.1: Lista de estaciones en el volcán de Pacaya



Figura 5.2: Red de estaciones sísmicas encargadas de monitorear el volcán de Pacaya

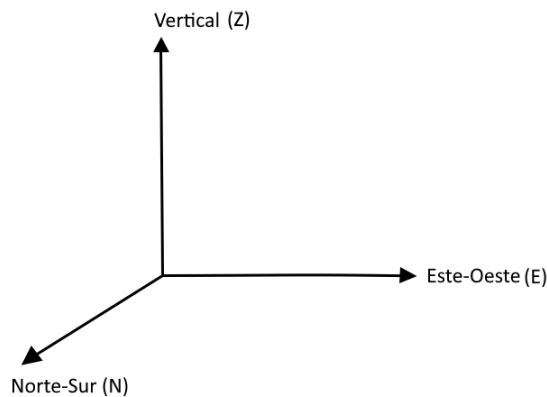


Figura 5.3: Orientaciones tradicionales en los registros sísmicos

5.3. Ruido sísmico ambiental

El término “ruido sísmico ambiental” se refiere a las ondas sísmicas generadas por fuentes tanto humanas como naturales, las cuales no presentan una señal clara y fácilmente identificable (Nakata et al., 2019). Estas señales son conocidas como medidas sísmicas pasivas y, aunque aparentemente son desordenadas, siguen las leyes de la física, lo que les confiere una estructura coherente. Dicha estructura puede aprovecharse para transformar el ruido en una señal determinista a través de la técnica de interferometría sísmica pasiva (Wapenaar et al., 2010). Además, el ruido sísmico ambiental se utiliza para calcular la velocidad de onda en la superficie, permitiendo una mejor caracterización de las estructuras subterráneas (Sang et al., 2013).

5.4. Métodos matemáticos para el análisis de ruido sísmico: Correlación

La correlación es una operación matemática que permite cuantificar la similitud entre dos señales y es utilizada frecuentemente para detectar una forma de onda determinada que se encuentra en un ambiente ruidoso (Smith, 1999; Babu, 2008). La correlación, que puede aplicarse a funciones discretas o continuas, utiliza dos señales para producir una tercera a la cual se le denomina “correlación cruzada” de las dos señales de entrada (Smith, 1999). Cuando se realiza una correlación de una señal consigo misma, la señal resultante se denomina “autocorrelación” (Smith, 1999).

5.4.1. Correlación cruzada

La correlación entre dos señales $x(t)$ y $y(t)$ puede expresarse matemáticamente como:

$$c_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t + \tau)dt \quad (5.1)$$

donde τ es un parámetro de retraso entre las señales, de manera que $x(t)$ es la secuencia de referencia (Babu, 2008). Esta ecuación puede transformarse al dominio de frecuencias utilizando los teoremas de la transformada de Fourier.

$$\mathcal{F}(c_{xy})(\tau) = C_{xy}(f) = X^*(f)Y(f) \quad (5.2)$$

5.4.2. Autocorrelación

La autocorrelación se define como la correlación de una señal con una versión retrasada de ella misma:

$$c_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t + \tau)dt \quad (5.3)$$

y tiene las siguientes propiedades:

- La función de autocorrelación es una función par
 $c_{xx}(-\tau) = c_{xx}(\tau)$
- Tiene un valor máximo en $\tau = 0$

5.5. Interferometría sísmica

La interferometría sísmica es una técnica que utiliza la correlación cruzada de las respuestas de diferentes receptores para determinar las funciones de Green entre estos, y se basa en el principio de generar nuevas respuestas sísmicas de fuentes virtuales a través de la correlación cruzada de observaciones sísmicas en receptores colocados en distintos sitios (Wapenaar et al., 2010). Al considerar una ecuación diferencial que depende de coordenadas espaciales y temporales, las funciones de Green aparecen como respuestas de la ecuación a impulsos en posiciones y tiempos dados (Arfken et al., 2013). La respuesta que se obtiene al hacer la correlación cruzada de los registros de dos receptores distintos puede interpretarse como la respuesta que se mediría en el sitio de uno de los receptores si la fuente se encontrara en el otro (Wapenaar et al., 2010).

Cuando se usa la interferometría sísmica para transformar mediciones sísmicas pasivas, tales como el ruido sísmico, en respuestas sísmicas deterministas, se habla de “interferometría sísmica pasiva”,

en la cual, las respuestas correlacionadas son una superposición de fuentes no correlacionadas que actúan simultáneamente (Wapenaar et al., 2010).

Siguiendo el ejemplo unidimensional de la Figura 5.4, se tiene una fuente impulsiva unitaria en $x = x_S$ y $t = 0$, que se propaga hacia la derecha a lo largo del eje x , con velocidad constante c en un medio no atenuante. La respuesta del receptor localizado en x_A mostrada en (b) puede expresarse como una función de Green denotada por: $G(x_A, x_S, t) = \delta(t - t_A)$. De la misma manera, la respuesta del receptor localizado en x_B , mostrada en (c), se denota como $G(x_B, x_S, t) = \delta(t - t_B)$. La Figura 5.4 (d) se interpreta como la respuesta observada en x_B dada una fuente en x_A , de manera que la función de Green se denota como $G(x_B, x_A, t) = G(x_B, x_S, t) * G(x_A, x_S, -t)$ (Wapenaar et al., 2010), la cual corresponde a una correlación cuyo resultado es

$$G(x_B, x_A, t) = \delta(t - (x_B - x_A)/c) \quad (5.4)$$

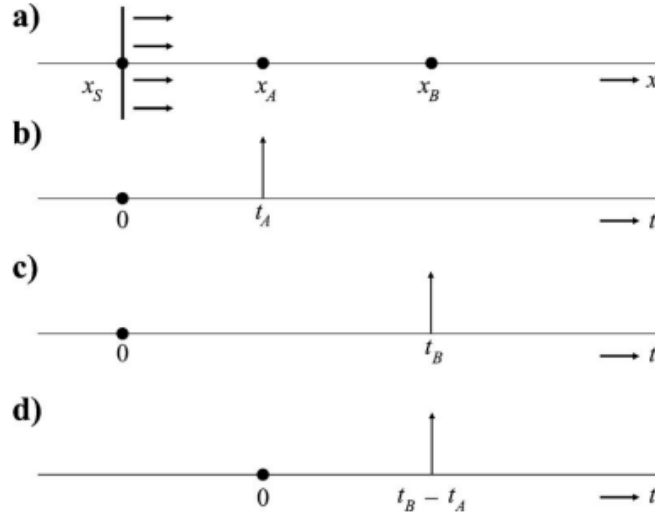


Figura 5.4: Ejemplo de interferometría de ondas. a) Onda plana emitida en x_S , en donde se considera la fuente. b) Respuesta observada en el primer receptor que se encuentra en x_A . c) Respuesta observada en el segundo receptor que se encuentra en x_B . d) Correlación cruzada entre los receptores en x_A y x_B .

Tomada de (Wapenaar et al., 2010).

Cuando la fuente no es impulsiva, sino está definida por una ondeleta $s(t)$, las respuesta en x_A es $u(x_A, x_S, t) = G(x_A, x_S, t) * s(t)$, y la respuesta en x_B es $u(x_B, x_S, t) = G(x_B, x_S, t) * s(t)$. La correlación cruzada de las respuestas en los dos receptores, $u(x_A, x_S, t)$ y $u(x_B, x_S, t)$, es la función de Green entre estos receptores convolucionada con la autocorrelación de la función de la fuente, $S_S(t) = s(t) * (s - t)$ (Wapenaar et al., 2010), de modo que

$$G(x_B, x_A, t) * S_S(t) = u(x_B, x_S, t) * u(x_A, x_S, -t) \quad (5.5)$$

Como ejemplo, la Figura 5.5 muestra las respuestas en a) x_A y b) x_B para una fuente de ruido de banda limitada $N(t)$ localizada en x_S , donde el tiempo de viaje entre los dos receptores es 0.6 s, de modo que la respuesta en x_B se retrasa 0.6 s respecto de la respuesta en x_A . La correlación cruzada de las respuestas mostrada en c), produce un impulso de banda limitada, centrado en $t = 0.6$ s, que es la respuesta impulsiva entre x_A y x_B convolucionada con $S_N(t)$ (la autocorrelación de $N(t)$).

Identificar la respuesta al impulso entre sensores es importante ya que cambios en los tiempos de llegada pueden significar un cambio en la velocidad del medio o un cambio en la posición de la fuente. Las variaciones en la velocidad sísmica relativa pueden deberse a dos tipos de fuentes, las locales y las regionales. Las fuentes locales son aquellas que se relacionan a los cambios en la presión barométrica, actividad sísmica o precipitaciones. Las fuentes regionales son las que se relacionan con los cambios en las posiciones de las fuentes del ruido (Lecocq et al., 2014b).

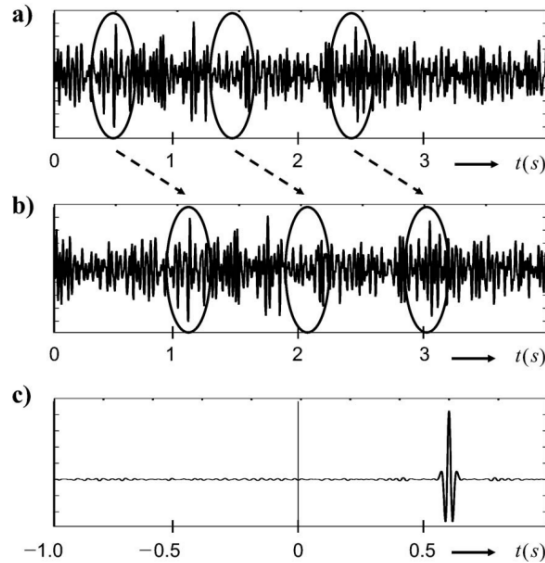


Figura 5.5: Ejemplo de la respuesta sísmica a una fuente de ruido $N(t)$ en x_S . (a) Señal registrada en x_A , mostrando la respuesta al ruido. (b) Señal registrada en x_B , evidenciando un patrón similar al de x_A . (c) Función de correlación cruzada entre las señales registradas, resaltando la relación entre ambas estaciones.

Tomada de Wapenaar et al. (2010).

Diversos estudios han demostrado que la interferometría sísmica pasiva es una herramienta efectiva para el monitoreo volcánico en distintas regiones del mundo. Ya que se identifican cambios específicos antes, durante y después de una explosión. Además que pueden proporcionar información sobre el tipo de actividad volcánica.

Anggono, Nishimura, Sato, Ueda, y Ukawa (2012) determinaron cambios en la velocidad sísmica antes y después del periodo de actividad de los años 1999-2000 del volcán Miyakejima. Se realizó la correlación cruzada de las señales provenientes de cinco estaciones de periodo corto. Se utilizaron las bandas de frecuencia de 0.4 - 0.8 Hz y 0.8 - 1.6 Hz para la detección de ondas superficiales. Para ambas bandas de frecuencia se determinaron incrementos y disminuciones en la velocidad sísmica, alcanzando valores de 3.3% y 2.3% respectivamente. Los incrementos en la velocidad sísmica se observaron en las estructuras poco profundas del edificio volcánico y se atribuyeron a la compresión causada por las fuentes de deflación asociadas a la actividad del magma. Las disminuciones en la velocidad sísmica se observaron en regiones cercanas a la caldera colapsada y se atribuyeron a los cambios topográficos y el debilitamiento estructural.

Duputel et al. (2009) exploraron el uso de las funciones de correlación cruzada del ruido sísmico ambiental para investigar erupciones del volcán Piton de la Fournaise. Demostraron que es una técnica óptima para el monitoreo en tiempo real de las variaciones de la velocidad sísmica meno-

res al 1%. Se interpretaron los cambios en la velocidad sísmica como un efecto de la dilatación o compresión del edificio dadas las variaciones de presión, siendo más afectadas las estaciones cercanas al cono. También se observó una disminución en la velocidad sísmica que puede vincularse con el vacío creado por la intensa fracturación de la columna de roca por encima de la cámara de magma.

El enfoque de utilizar estaciones individuales para la interferometría sísmica del ruido sísmico ambiental ha sido menos investigado. (De Plaen et al., 2016) utilizaron este enfoque para investigar las variaciones en la velocidad sísmica ocasionadas por una sola erupción. Se utilizaron las correlaciones de las tres componentes de tres sensores de banda ancha. Las correlaciones realizadas con los componentes cruzados presentaron más estabilidad que los que se realizaron con las mismas componentes. Se determinó que la sismicidad disminuye antes y después de las erupciones. Y se tuvo un mejor rendimiento al utilizar frecuencias altas entre 1 - 2 Hz y 0.5 - 1 Hz para las componentes cruzadas y mismas componentes, respectivamente. El buen rendimiento de utilizar las frecuencias altas se asocia a la mayor amplitud de estas frecuencias en el contenido de ruido ambiental que muestra los cambios en el medio, proporcionando una observación clara y estable de las variaciones en la velocidad sísmica. Se indica que esta es una perspectiva viable para el monitoreo de los volcanes que cuentan con uno o pocos sismómetros de tres componentes.

Para realizar interferometría sísmica pasiva no es necesario utilizar dos estaciones (receptores) distintas. Esta puede funcionar con datos de una sola estación, ya que las respuestas correlacionadas corresponden a una superposición de varios medios no correlacionados que actúan como fuentes. Por lo tanto, si hay más de una estación, las señales de estas se analizan como si una fuera la fuente de la otra (Wapenaar et al., 2010).

Este método se basa en la hipótesis de un campo de ondas sísmicas difuso con energía procedente de muchas direcciones diferentes, y puede usarse para ondas de cuerpo y ondas superficiales, aunque en su mayoría se ha implementado para las últimas ya que el ruido sísmico ambiental se propaga predominantemente como ondas Rayleigh. (Heath, Hooft, y Toomey, 2018)

5.6. Análisis de ruido sísmico con MSNoise

El software MSNoise (Lecocq et al., 2014b) es un paquete de Python desarrollado por los doctores Thomas Lecocq y Corentin Caudron en 2014, que permite monitorear los cambios en la velocidad sísmica relativa y los cambios de tiempo relativo a partir del ruido ambiental.

MSNoise sigue cuatro pasos principales para monitorear los cambios en la velocidad sísmica (Lecocq et al., 2014a):

1. Calcular las Funciones de Correlación Cruzada (CCFs) del ruido sísmico ambiental utilizando diferentes fechas y pares de sensores. Deben observarse pequeños cambios en la correlación cruzada si hay un cambio de velocidad, y un cambio drástico en la correlación si cambia el origen del ruido sísmico (Lecocq et al., 2014b).
2. Apilar las funciones de correlación individuales en periodos más largos. Determinar y apilar una función de referencia.
3. Determinar las coherencias medias y desfases temporales relativos entre las CCF individuales y una CCF de referencia utilizando el análisis de espectro cruzado de ventana móvil (MWCS)
4. Determinar las variaciones en la velocidad relativa a partir de los retardos temporales relativos.

5.6.1. Cálculo de funciones de correlación cruzada

MSNoise realiza el procedimiento de correlación cruzada en el dominio de la frecuencia, donde los complejos conjugados equivalen a la secuencia invertida, de manera que se utiliza la expresión:

$$C_{xy}(f) = X^*(f) * Y(f) \quad (5.6)$$

Donde $X(f)$ y $Y(f)$ y $X^*(f)$ y $Y^*(f)$ son las transformadas de Fourier y los complejos conjugados de las secuencias $x(t)$ y $y(t)$ respectivamente. A $C(f)$ se les conoce como las funciones de correlación cruzada (CCF) (Lecocq et al., 2014b).

MSNoise permite realizar correlaciones cruzadas, autocorrelaciones y componentes cruzadas con la misma estación, de manera que pueden calcularse los componentes EE, EN, EZ, NN, NZ, ZZ.

5.6.2. Apilamiento

Las funciones de correlación cruzada calculadas deben apilarse en periodos más largos para incrementar la calidad de la señal (Yang et al., 2022). La elección de los periodos para el apilamiento puede resaltar u ocultar características de los datos. MSNoise permite realizar apilamientos de 1, 2, 5, 10 y 30 días. Además, en esta etapa debe definirse una función de referencia y realizar su apilamiento. Para ello, se debe identificar un periodo en el que la actividad volcánica fue estable, ya que si durante el intervalo de referencia ocurrieron grandes variaciones en la velocidad, la calidad disminuirá. El intervalo de fechas para la función de referencia puede definirse utilizando fechas exactas o intervalos relativos (Lecocq et al., 2014b).

5.6.3. Estimación de variaciones del tiempo de viaje relativo

El espectro cruzado se define como la transformada de Fourier de la correlación cruzada (Bretherton 2015). El software MSNoise utiliza la técnica de análisis de espectro cruzado de ventana móvil (MWCS) para estimar los retardos temporales. Esta técnica fue introducida por Poupinet, Ellsworth, y Fréchet (1984) para la recuperación de las variaciones de velocidad relativa entre dobletes de terremotos. En estudios posteriores se comprobó su eficacia con ruido ambiental en ambientes volcánicos (Brennguier et al., 2008), y tiene la ventaja de operar en el dominio de la frecuencia, donde el ancho de banda de una señal coherente puede definirse claramente en la función de correlación (Clarke et al., 2011).

En primer lugar, la CCF actual se compara con la función de referencia cortando su serie temporal en N ventanas superpuestas, cada una de las cuales se transforma al dominio de frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT). Se utilizan $F_{cur}(\nu)$ y $F_{ref}(\nu)$ para denotar la transformada de Fourier de la CCF actual y la de referencia, respectivamente. El espectro cruzado $X(\nu)$, que es la relación entre las dos señales, está dado por:

$$X(\nu) = F_{ref}(\nu) * F_{cur}^*(\nu) \quad (5.7)$$

Se calcula la amplitud de la transformada de Fourier de la señal actual y la de referencia:

$$\begin{aligned} |F_{cur}(\nu)|^2 &= Re(F_{cur})^2 + Im(F_{cur})^2 \\ |F_{ref}(\nu)|^2 &= Re(F_{ref})^2 + Im(F_{ref})^2 \end{aligned} \quad (5.8)$$

El espectro cruzado sirve para calcular la coherencia cruzada entre las densidades de energía, la cual se utiliza para evaluar estadísticamente la relación entre las señales. La coherencia se asemeja

a un coeficiente de correlación y puede tomar valores de 0 a 1. Los valores cercanos a 1 indican que las densidades espectrales de las frecuencias son similares.

La coherencia cruzada se define por:

$$C(\nu) = \frac{\overline{|X(\nu)|}}{\sqrt{\overline{|F_{ref}(\nu)|^2} \overline{|F_{cur}(\nu)|^2}}} \quad (5.9)$$

donde la sobrelínea significa que los datos deben alisarse con los filtros necesarios.

El tiempo de retardo entre el CFF actual y la referencia se define en la fase *unwrapped* del espectro cruzado $\phi(\nu)$ y es linealmente proporcional a la frecuencia. La fase *unwrapped* es un procedimiento realizado para devolver una señal de fase continua libre de saltos de 2π (Lilley y Gdeisat, 2011). Se puede definir como

$$\phi_j = m\nu_j \quad m = 2\pi\delta t \quad (5.10)$$

El desplazamiento temporal δt_j (i -ésima ventana) entre dos señales se estima a partir de la pendiente m de una regresión lineal ponderada de de las muestras:

$$m = \frac{\sum_{j=l}^h w_j \nu_j \phi_j}{\sum_{j=l}^h w_j \nu_j^2} \quad (5.11)$$

donde w_j son los pesos que se asignan a cada valor de fase cruzada durante la regresión. Estos dependen de la coherencia cruzada y la amplitud espectral cruzada (Clarke et al., 2011), y se definen como

$$w_j = \sqrt{\frac{C_j^2}{1 - C_j^2}} \cdot \sqrt{|X_j|} \quad (5.12)$$

El desajuste al cuadrado (*squared misfit*) de la pendiente modelada está dado por:

$$\sigma_\phi^2 = \frac{\sum_j (\phi_j - m\nu_j)^2}{N - 1} \quad (5.13)$$

y el error asociado e_m se puede estimar utilizando la propagación de error:

$$e_m = \sqrt{\sum_j \left(\frac{w_j \nu_j}{\sum_i w_i \nu_i^2} \right)^2 \sigma_\phi^2} \quad (5.14)$$

Este proceso se realiza para cada ventana, obteniendo N_w (número de ventanas) estimaciones de tiempo de retardo entre las dos funciones de correlación cruzada. Estos datos se interpretan como una matriz de retrasos para cada día (Lecocq et al., 2014b).

5.6.4. Variaciones en la velocidad

Finalmente, dado un desplazamiento temporal relativo $\delta t/t$ entre la CFF actual y la de referencia, y si se considera una variación de velocidad relativa $\delta v/v$ homogénea en el espacio, puede considerarse la relación:

$$\delta v/v = -\delta t/t \quad (5.15)$$

Por ello, MSNoise calcula $\delta t/t$ y transforma a $\delta v/v$ cuando es necesario. Para este cálculo se realiza una regresión ponderada por mínimos cuadrados (WLS) para cada $M + 1$ líneas de la matriz de retrasos calculada.

La WLS se calcula dos veces, lo cual permite estudiar las posibles variaciones de posición de la fuente de ruido:

1. Permitiendo una constante, la cual representa un posible desplazamiento debido al instrumento

$$\delta t = a + mt \tag{5.16}$$

2. Forzando un intercepto en el origen

$$\delta t_0 = m_0 t \tag{5.17}$$

6.1. Identificación de los periodos de actividad durante el 2019-2024

Para identificar los distintos tipos de actividad que ocurrieron durante el periodo de estudio, se realizó la lectura de los boletines especiales emitidos por INSIVUMEH, los cuales indican actividad inusual en el volcán.

Se identificaron los eventos principales de este periodo de actividad:

Tipo de actividad	Periodo
Flujo de lava en el flanco suroeste	Abril 27 2020 - Julio 6 2020
Destrucción y construcción del cráter	Agosto 14 2020 - Octubre 8 2020
Flujo de lava en el flanco suroeste	Octubre 26 2020 - Enero 7 2021
Columna de desgasificación	Septiembre 13 2020 - Enero 22 2021
Flujo de lava en el flanco sur	Enero 22 2021 - Marzo 17 2021
Columna de desgasificación	Febrero 06 2021 - Febrero 14 2021
Columna de desgasificación	Febrero 17 2021 - Mayo 15 2021
Flujo de lava en el flanco suroeste	Marzo 17 2021- Mayo 15 2021
Erupción	Marzo 3 2021 - Marzo 4 2021
Fase eruptiva general	Febrero 2021 - Mayo 2021

Tabla 6.1: Tipos de actividad 2020-2021

6.1.1. Descripción del periodo efusivo y eruptivo 2020-2021

Abril 27 2020 - Julio 6 2020

La actividad eruptiva y efusiva comienza el 27 de abril de 2020 con un flujo de lava en el flanco suroeste de aproximadamente 400 metros y explosiones moderadas; no se observa columna de desgasificación. El flujo de lava en el flanco sur se mantiene hasta el 06 de julio, con longitudes entre los 100 m y 800 m. Durante estos meses surgen flujos adicionales en los flancos noroeste, sur

y norte, se mantienen las explosiones moderadas de material incandescente. Solamente se observa columna de desgasificación durante el 23 de junio.

Agosto 14 2020 - Octubre 8 2020

El 14 de agosto comienza un periodo de construcción y destrucción del cráter. También empieza un flujo de lava en el flanco noroeste que se mantiene activo hasta el 21 de agosto, con longitudes que varían entre los 100 m y 300 m. Se presentan explosiones moderadas a fuertes de material incandescente y balísticos. El 28 de agosto comienzan dos flujos de lava en los flancos norte y noreste con longitudes entre 50 m - 600 m y 300 m - 1250 m, respectivamente; estos flujos terminan el 13 de septiembre. El 16 de septiembre aparece un flujo de lava en el flanco sur con longitud de 400 m. El 26 de septiembre comienzan dos flujos de lava en los flancos norte y noreste que se extienden 300 m y 500 m, respectivamente. Durante este lapso continúa la construcción y destrucción del cráter para culminar el 8 de octubre, incrementan los flujos de lava surgiendo 4 en los flancos norte y este.

Septiembre 13 2020 - Enero 22 2021

Luego de aproximadamente tres semanas surge una columna de desgasificación en el cráter, la cual permanece constante durante varios meses. Del 26 de octubre al 08 de noviembre esta alcanza su altura máxima de 900 metros sobre el nivel del cráter. El 26 de octubre 2020 luego de 18 días sin actividad efusiva superficial surgen dos flujos de lava en los flancos norte y suroeste con longitudes respectivas de 300 m y 800 m. El flujo en el flanco suroeste se mantiene activo hasta el 07 de enero 2021, variando su longitud entre los 400 m y los 1000 m. En este intervalo surgen flujos de lava adicionales en los flancos noroeste y norte.

Se mantienen las explosiones moderadas a fuertes de material volcánico y ceniza. Y periodos esporádicos de construcción y destrucción del cráter.

Enero 22 2021 - Marzo 17 2021

El 22 de enero surge un nuevo flujo de lava en el flanco sur, aproximadamente de 1000 m de longitud. El 06 de febrero este flujo se divide en dos ramificaciones de 800 m y 1200 m. El flujo principal se mantiene con longitudes entre 900 m - 1300 m hasta el 01 de Marzo, en el que se divide en tres ramificaciones cada uno con una longitud entre los 800 m - 1000 m. Para el 08 de marzo solo una de las ramificaciones perdura, la cual se prolonga hasta el 17 de marzo, manteniendo longitudes entre los 1000 m y 1700 m. Durante todo este periodo las explosiones moderadas a fuertes fueron constantes, así como la columna de desgasificación.

Marzo 17 2021- Mayo 15 2021

Surgen tres flujos de lava en los flancos suroeste, sureste y sur con longitudes de 500 m, 500 m y 400 m, respectivamente. Los flujos de los flancos sureste y suroeste permanecen activos de manera simultánea hasta el 22 de marzo, alcanzado longitudes de 800 m y 2500 m. Durante las siguientes 3 semanas se mantiene activo el flujo del flanco suroeste, sobrepasando los 3500 m. Durante marzo y abril las explosiones fueron moderadas a fuertes, mientras que en mayo fueron débiles a nulas.

Febrero 17 2021 - Mayo 15 2021

Se mantuvo activa la columna de desgasificación, alcanzado los 1000 m -2000 m sobre el cráter. Esto produjo la caída de ceniza en aldeas aledañas.

6.1.2. Periodos eruptivos a considerar

Para facilitar el análisis del periodo de estudio, pueden identificarse las etapas pre-eruptiva, eruptiva y post-eruptiva. Aunque la etapa de actividad comenzó durante abril de 2020, se considera que la etapa eruptiva principal inicia en febrero de 2021, ya que el aumento en la intensidad de la actividad fue considerable.

Periodo	Duración
Pre-eruptivo	Octubre 2019 - Enero 2021
Eruptivo	Febrero 2021 - Mayo 2021
Post-eruptivo	Junio 2021 - Diciembre 2021

Tabla 6.2: Periodos principales de actividad definidos para este trabajo

6.2. Datos a utilizar

Durante los años 2019 a 2024, el volcán de Pacaya ha sido monitoreado de manera continua por INSIVUMEH utilizando 5 sensores sísmicos. La Tabla 6.3 muestra las estaciones, nombre, canal y tiempo de funcionamiento. Con el canal se puede identificar el tipo de banda de la estación: PCG y PCG2 son estaciones de Periodo Corto (SHZ), PCG4 es una estación de Banda Ancha (BHZ) y PCG6 es una estación de Banda Ancha Alta (HHZ). PCG5 durante los años 2019, 2020 y 2021 funcionó como una estación de Banda Ancha (BHZ) y durante los años 2022, 2023 y 2024 como una estación de Periodo Corto (SHZ), por lo que se presenta como dos estaciones diferentes.

Estación	Nombre	Canal	Tiempo de funcionamiento
1	PCG	01 SHZ	2023/04 - aún en funcionamiento
2	PCG2	00 SHE, SHN, SHZ	2021/02 - aún en funcionamiento
3	PCG4	00 BHE, BHN, BHZ	2021/02 - aún en funcionamiento
4	PCG5	00 SHE, SHN, SHZ	2022/01 - 2024/04
5	PCG5	00 BHE, BHN, BHZ	2019/10 - 2021/12
6	PCG6	00 HHE, HHN, HHZ	2024/08 - aún en funcionamiento

Tabla 6.3: Lista de estaciones utilizadas en el análisis

En ocasiones, los sensores estos dejan de registrar datos por diversos motivos, de manera que para determinar los periodos que contienen datos utilizables para el análisis, es imprescindible realizar gráficos de disponibilidad de datos. Además, esto contribuye a determinar periodos ideales para autocorrelación, ya que para un mejor análisis se prefieren trazas sin demasiados agujeros. Las figuras 6.1 y 6.2 muestran la disponibilidad de datos por estación para el período de estudio.

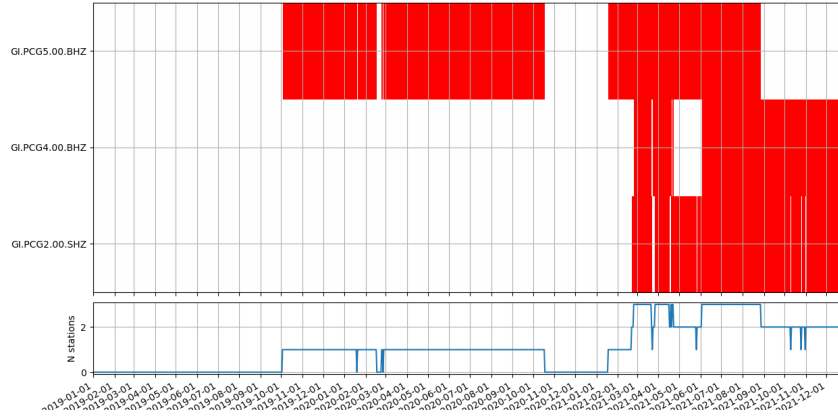


Figura 6.1: Disponibilidad de datos según la estación para los años 2019-2021

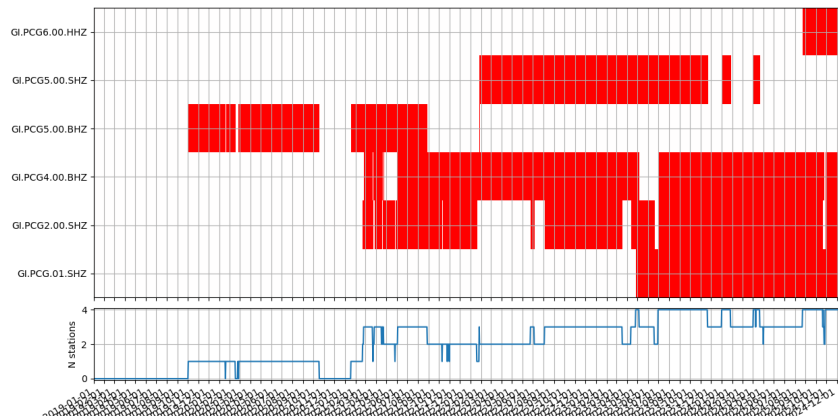


Figura 6.2: Disponibilidad de datos según la estación para los años 2019-2024

Como se observa en la Figura 6.1 para el periodo pre-eruptivo se cuentan con seis meses de datos de la estación PCG5 (BHZ). Durante los primeros meses del periodo eruptivo (abril 2020 - enero 2021) se cuenta con datos de la estación PCG5 (BHZ); sin embargo, los datos se ven interrumpidos durante casi tres meses (mitad de octubre 2020 a la mitad de enero 2021). Para los últimos meses de actividad (febrero 2021 - mayo 2021) se encontraban en funcionamiento 3 estaciones: PCG2, PCG4 y PCG5 (BHZ); sin embargo, PCG4 tuvo inconsistencia en datos durante marzo y abril y PCG2 no grabó datos del mes de mayo.

La Figura 6.2 muestra que el periodo post-eruptivo cuenta con una variedad de datos de las estaciones PCG con el canal de locación 01, PCG2, PCG4, PCG5 (SHZ) y PCG6, la mayoría con periodos sin inconsistencias en sus datos.

6.3. Procesamiento de las funciones de correlación

El ruido sísmico ambiental registrado por un instrumento es el resultado de una convolución entre las ondas sísmicas y la respuesta específica del instrumento. Si se están utilizando sensores de diferente tipo y, por ende, con diferente respuesta de instrumento, remover la respuesta de ambos sensores es crucial para poder realizar un análisis de correlación cruzada significativo. No es necesario remover la respuesta del instrumento si se utiliza la misma estación (autocorrelación) o si los sensores

son del mismo tipo, ya que los efectos de la respuesta del instrumento se cancelan durante el cálculo de las correlaciones (Liu, Xia, Zhang, Guan, y Xi, 2023).

Los sensores utilizados en este trabajo son todos de diferente tipo, por lo que se debe remover la respuesta del instrumento. Desafortunadamente, dado que los sensores han estado en funcionamiento durante un periodo largo, no se conoce con certeza que la respuesta del instrumento conocida sea correcta, de manera que, para evitar errores de cálculo utilizando señales modificadas por el sensor, solamente se realizarán autocorrelaciones y correlaciones entre los componentes Norte (N), Este (E), Vertical (Z) de la misma estación.

6.3.1. Preprocesamiento de las señales

Antes de realizar el análisis de autocorrelación, las señales deben pasar por un proceso de preprocesamiento, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 6.3. Este incluye alineamiento, suavizado, verificación de agujeros en las trazas, filtros de paso-alto y paso-bajo y remuestreo. Para esto, el software requiere de diversos parámetros:

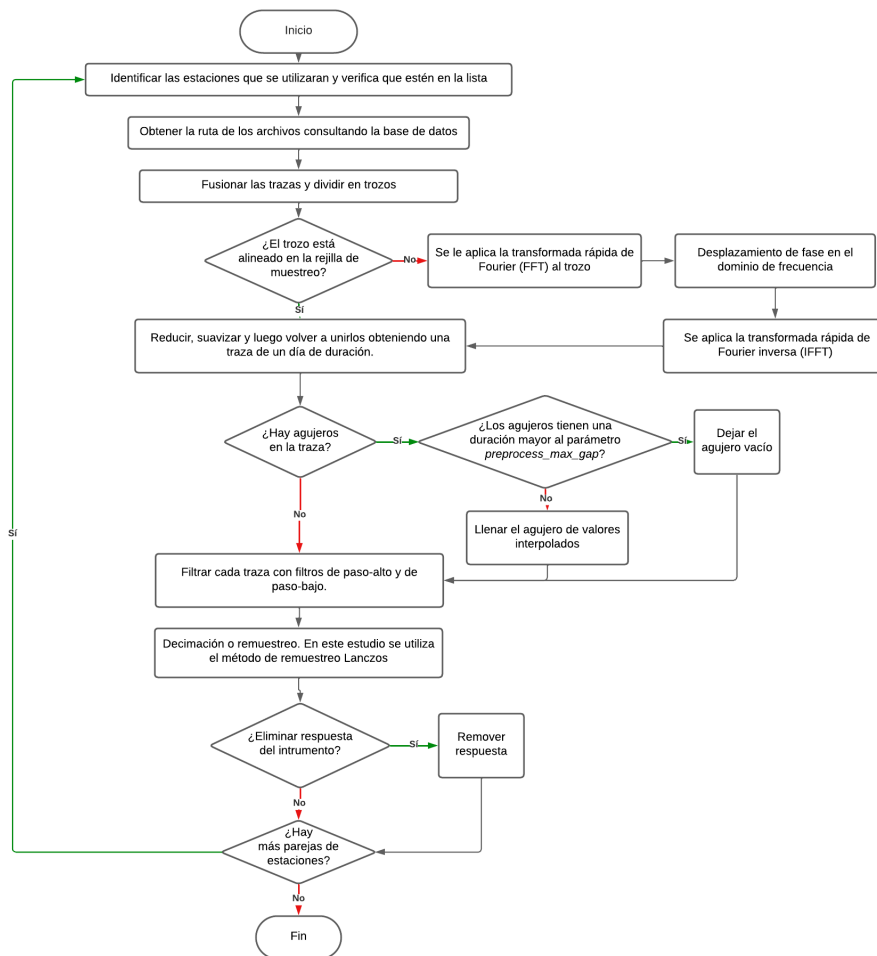


Figura 6.3: Diagrama de flujo para el preprocesamiento de los datos

- Los filtros de paso bajo y paso alto para el preprocesamiento indican las frecuencias máxima y mínima a analizar, por lo que las frecuencias mayores o menores que las indicadas no se

utilizarán.

- La brecha máxima para el preprocesamiento indica la duración máxima que puede tener un agujero dentro de la traza analizada. Como se indica en la Figura 6.3, si la duración del agujero es menor a la especificada, este se rellena de valores interpolados, mientras que, si es mayor, el agujero se deja vacío.
- La longitud de suavizado (*taper*) durante el preprocesamiento indica cuántos segundos de los extremos de la ventana se suavizarán utilizando una función que decae suavemente hasta cero, con el fin de minimizar el efecto de la discontinuidad entre el principio y el final de la serie temporal (Pilz y Parolai, 2012).
- El método Lanczos de remuestreo se utiliza para suavizar la señal y se utiliza generalmente para aumentar la frecuencia de muestreo de una señal digital (Imiya et al., 2005)

Para este estudio, dichos parámetros se fijaron en los valores mostrados en la Tabla 6.4

Parámetro	Valor
Filtro de paso bajo para preprocesamiento (<i>preprocess_lowpass</i>)	7 Hz
Filtro de paso alto para preprocesamiento (<i>preprocess_highpass</i>)	0.7 Hz
Brecha máxima para preprocesamiento (<i>preprocess_max_gap</i>)	10 s
Longitud de suavizado para preprocesamiento (<i>preprocess_taper_length</i>)	20 s
Decimación o remuestreo (<i>resampling_method</i>)	Lanczos

Tabla 6.4: Parámetros de configuración para el preprocesamiento de las señales

6.3.2. Procesamiento

Si se desea analizar distintas bandas de frecuencia, el procesamiento de correlación debe realizarse de forma independiente para cada una. Para ello, es necesario definir filtros, de manera que las funciones de correlación se calculen para cada filtro utilizando como límites la frecuencia mínima y máxima correspondientes. La Tabla 6.5 muestra los filtros utilizados en este trabajo.

Filtro	Banda de frecuencia para el procesamiento
1	0.7-1.5 Hz
2	1.5-4.0 Hz
3	4.0-8.0 Hz

Tabla 6.5: Banda de frecuencia según el filtro utilizado

Además, el software MsNoise requiere de parámetros que indican características resultado final de la correlación:

- Los componentes a computar indican las correlaciones cruzadas a realizar, dado que solo se trabajan autocorrelaciones, este parámetro se deja vacío.
- Como se calcularán todos los componentes cruzados de una misma estación se colocan todas las combinaciones entre N, E y V.
- La razón de muestreo indica el número promedio de muestras obtenidas por segundo.

- Los datos se analizan por día por lo que la duración total del análisis es de 86400 s, esta se divide en ventanas según el parámetro *Duración de la correlación*, de manera que se calcula una función de correlación cada 1800 s. El retardo máximo indica cuánto se graficará de la función de correlación.
- El *winsorizing* es el proceso de reemplazar los valores atípicos por un valor umbral predefinido (Tukey, 1992). En este caso, el umbral se establece como tres veces el RMS (*Root Mean Square*) de la traza analizada, por lo que cualquier valor que exceda el rango $[-3RMS, 3RMS]$ se sustituye por dicho límite.
- El blanqueamiento, también conocido como normalización espectral, es una técnica que se utiliza para que el espectro de la señal sea más uniforme. Esto es necesario porque el ruido sísmico ambiental no es plano en el dominio de la frecuencia, contiene diversos picos provenientes de microsismos y lo que se conoce como zumbido de la Tierra (Bensen et al., 2007). El blanqueamiento no se utiliza al realizar autocorrelaciones ya que este fija la amplitud de la señal en 1 para todas las frecuencias, dejando sólo la fase de la señal, y la autocorrelación de una señal de este tipo ya no contiene información sobre el medio (De Plaen et al., 2016).

El resumen de estos parámetros se muestra en la Tabla 6.6 y las figuras 6.4 y 6.5 muestran los diagramas de flujo de la etapa de procesamiento.

Parámetro	Valor
Componentes a computar (<i>components_to_compute</i>)	-
Componentes para calcular en una misma estación (<i>components_to_compute_single_station</i>)	EE, EN, EZ, NN, NZ, ZZ
Razón de muestreo CC (<i>cc_sampling_rate</i>)	20 Hz
Duración del análisis (<i>analysis_duration</i>)	86400 s
Superposición (<i>overlap</i>)	0
Retardo máximo (<i>maxlag</i>)	50 s
Duración de la correlación (<i>corr_duration</i>)	1800 s
Winsorizing (<i>winsorizing</i>)	3 RMS
Blanqueamiento (<i>whitening</i>)	A

Tabla 6.6: Parámetros de configuración para el procesamiento de las funciones de correlación

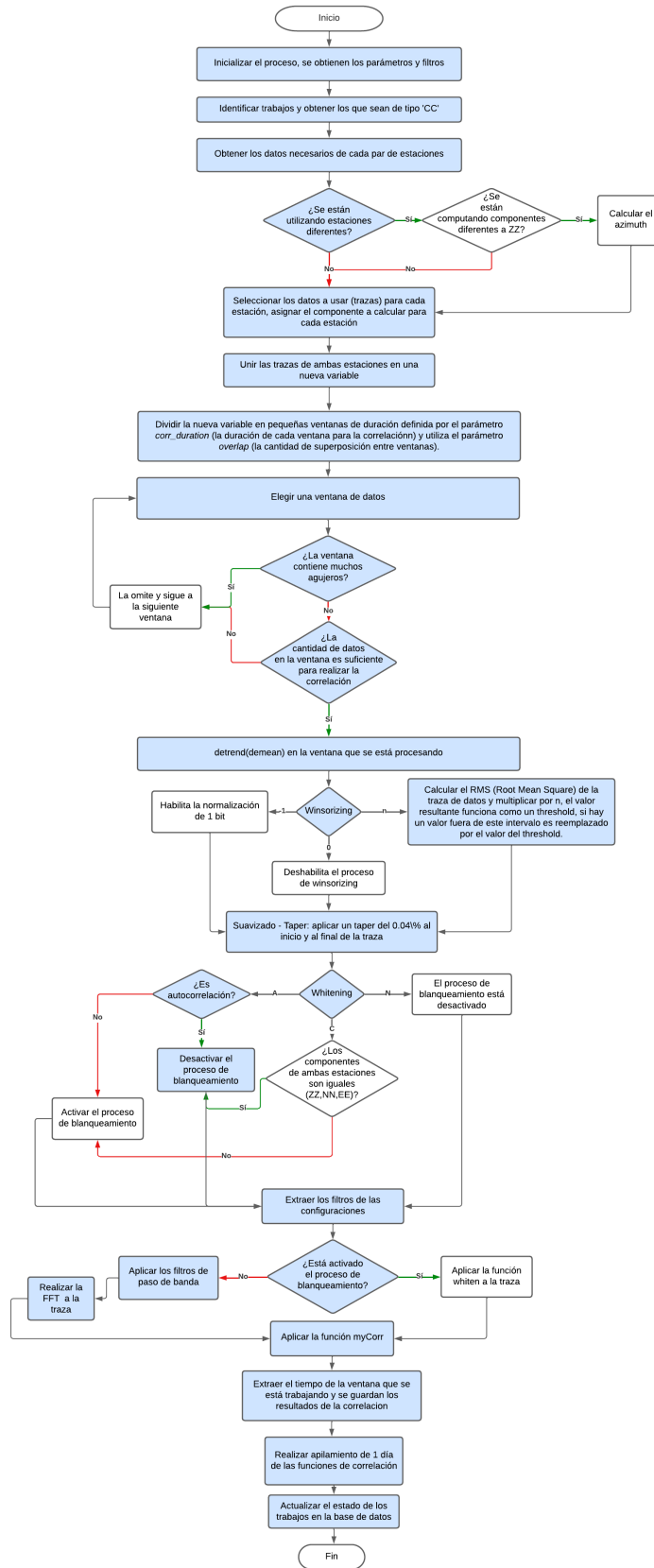


Figura 6.4: Diagrama de flujo para el procesamiento de la correlación cruzada, se marcan con azul los pasos que se siguieron en este estudio

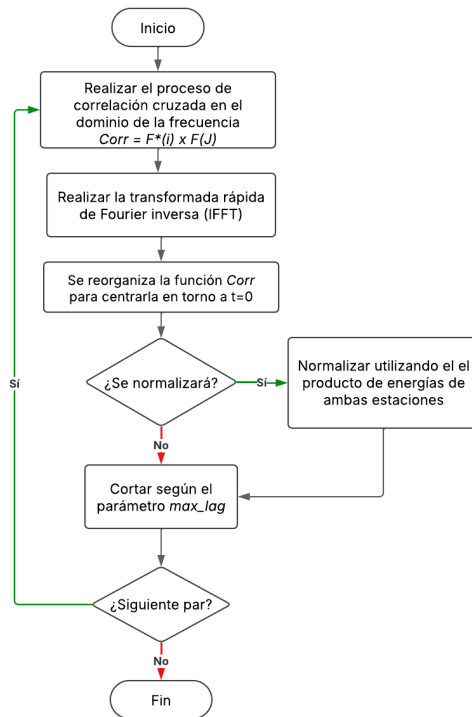


Figura 6.5: Diagrama de flujo para la función de correlación dentro del procesamiento

6.3.3. Apilamiento

Debido al comportamiento y tipo de actividad del volcán de Pacaya, las funciones de correlación se apilan linealmente cada 2, 5 y 10 días. Para esto se especifican las duplas (2d,2d), (5d,5d) y (10d,10d). El primer valor indica cuántos días de funciones de correlación se apilarán, y el segundo valor indica el paso con el que avanzará la ventana de apilamiento. Por ejemplo, (2d, 2d) indica que se apilarán las funciones de correlación de un período de dos días y luego la ventana avanzará a los siguientes dos días para calcular el siguiente apilamiento.

El método de apilamiento lineal indica que la función de correlación de un día es la función de todas las ventanas procesadas para ese día (Lecocq, 2019).

Durante el apilamiento se debe definir una función que se utiliza como referencia de un periodo en el que el volcán tuvo actividad estable, la cual servirá para determinar los momentos en donde se dieron cambios en la velocidad relativa del medio. Tomando en cuenta el tipo de actividad del volcán de Pacaya y que se están analizando aproximadamente seis años de datos, utilizar una sola función de referencia no permitiría ver cambios de manera significativa. Además, no hay un periodo en el que todas las estaciones estuvieran activas de manera simultánea, por lo que se definen 3 funciones de referencia para distintas estaciones y periodos como se muestra en la Tabla 6.7.

La primera función de referencia se utiliza para procesar los datos de los años 2019-2021 de la estación PCG5 (Banda ancha). Se eligió de esta manera ya que se engloba el periodo de actividad principal y fue la única estación activa durante los años 2019 y 2020.

Función de referencia	Inicio	Final	Estaciones	Periodo de análisis
1	2019-12-01	2019-12-31	PCG5 (Banda ancha)	2019 - 2021
2	2022-11-01	2022-11-30	PCG2 y PCG4, PCG5 (periodo corto)	2021 - 2022, 2022-2023
3	2024-09-01	2024-09-30	PCG, PCG2, PCG4, PCG6	2023 - 2024

Tabla 6.7: Funciones de referencia

La segunda función de referencia se utiliza para analizar datos de las estaciones PCG2, PCG4 y PCG5 (periodo corto). Para las estaciones PCG2 y PCG4 esta se utiliza para los años 2021 y 2022. Para la estación PCG5 se emplea para los años 2022 y 2024. Como se observa en la Figura 6.2, durante el 2024 la estación PCG5 operó únicamente durante algunos días de enero y febrero, por lo que no es necesario definir otra función para ellos.

La función de referencia 3 se utiliza para las estaciones PCG, PCG2, PCG4 y PCG6 para los datos de los años de 2023 y 2024.

6.4. Análisis de ventana móvil de espectro cruzado (MWCS) en MSNoise

Se utiliza el procedimiento matemático de ventana móvil de espectro cruzado descrito en la Sección 5.6.3, para comparar dos series de tiempo (actual y de referencia), con el fin de medir el tiempo de retardo entre ellas. Esto se realiza en el dominio de la frecuencia. El diagrama de flujo para esta etapa se muestra en la Figura 6.6.

Cada filtro definido durante el procesamiento de las funciones de correlación también utiliza frecuencias diferentes durante el MWCS. Se utiliza una banda de frecuencia ligeramente menor a la utilizada durante el procesamiento de las funciones de correlación. Los parámetros requeridos en esta etapa son (Tabla 6.8):

- La banda de frecuencia MWCS indica los límites de frecuencia de la regresión lineal realizada durante el proceso de MWCS.
- La señal actual y la de referencia se cortan en ventanas definidas por el parámetro *Longitud de ventana MWCS*. Indica la duración de las ventanas en las que se divide la señal para el procesamiento de MWCS. Antes de realizar el corte, las funciones son suavizadas con una función de coseno.
- El paso del procedimiento de ventana para MWCS controla cuánto avanza la ventana cada vez que se procesa un nuevo segmento de la señal.

Filtro	Banda de frecuencia MWCS ($[mwcs_low, mwcs_high]$)	Longitud de ventana MWCS ($window_length$)	Paso MWCS ($mwcs_step$)
1	0.8-1.3 Hz	10.0 s	5.0 s
2	1.6-3.9 Hz	10.0 s	5.0 s
3	4.1-7.9 Hz	10.0 s	5.0 s

Tabla 6.8: Banda de frecuencia para MWCS según el filtro utilizado

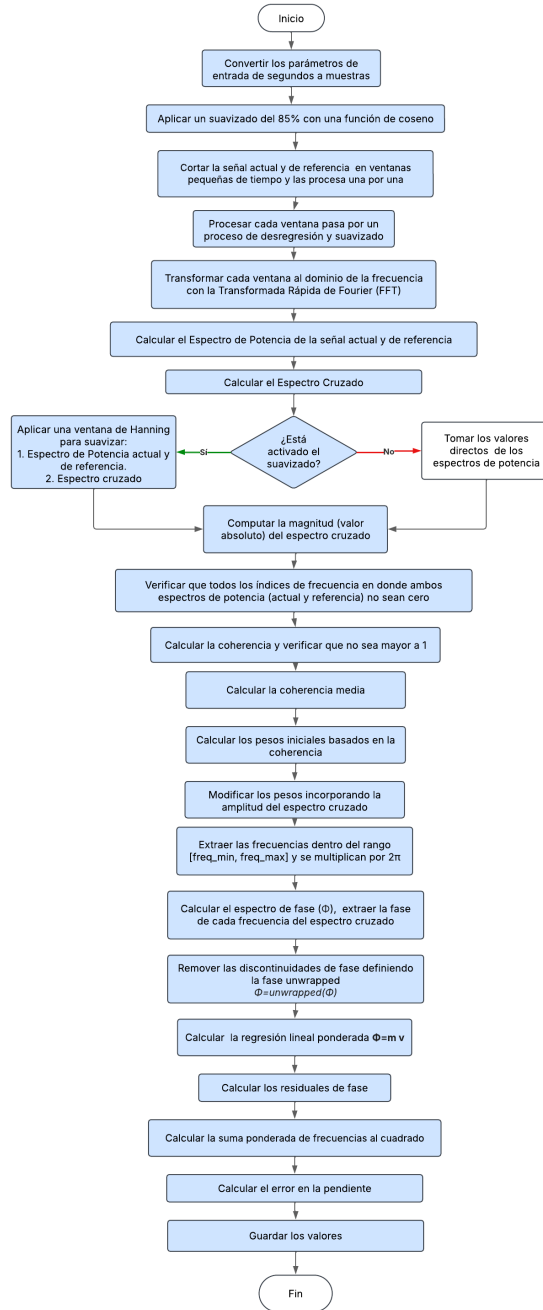


Figura 6.6: Diagrama de flujo para la función de la ventana móvil de espectro cruzado (MWCS)

Entonces, las dos series temporales, *actual* y *referencia*, se dividen en múltiples ventanas solapadas, cuyo tamaño está determinado por *window_length*, y se desplazan con un paso dado por *mwcs_step*. Antes de su análisis en el dominio de la frecuencia, cada ventana se preprocesa mediante la eliminación de la tendencia lineal (*detrend*) y la aplicación de un suavizado de coseno del 85% para minimizar efectos de bordes.

La similitud entre ambas series se mide mediante la coherencia cruzada (Ec. 5.9), calculada a partir del espectro cruzado normalizado por las densidades de energía de cada señal en el dominio

de la frecuencia. El espectro cruzado (Ec. 5.7) se obtiene multiplicando la transformada de Fourier de la *referencia* por la conjugada de la transformada de la *actual*.

Luego, el software aplica una ventana de Hanning al espectro cruzado y a los espectros de potencia de la actual y de la referencia (Ec. 5.8) para la reducción de fugas en el análisis. La fuga es un error que ocurre cuando la potencia o energía aparece en regiones de frecuencia fuera de aquellas en las que se producen los fenómenos físicos reales, de manera que la potencia se ha “fugado” a regiones vecinas (Braun, 2001).

El retardo temporal entre ambas series se determina analizando la fase *unwrapped* del espectro cruzado. Como la fase de la coherencia cruzada varía linealmente con la frecuencia, el retardo se obtiene mediante una regresión lineal ponderada (WLS, Sección 5.6.3) sobre la fase en la banda de frecuencia de interés [*mwcs_low*, *mwcs_high*]. En este proceso, los pesos incorporan tanto la amplitud del espectro cruzado como la coherencia cruzada, lo que da mayor relevancia a las frecuencias con mayor fiabilidad en la estimación del retardo. Esto se realiza para todos los días de apilamiento realizados.

6.5. Cálculo dt/t en MSNoise

Utilizando los resultados del análisis de de ventana móvil de espectro cruzado, se calculan los cambios de tiempo relativo. Para esto, el software requiere de la especificación de los siguientes parámetros:

- El tiempo de retardo mínimo *dt_minlag* a considerar en el análisis
- El criterio de desfase temporal se utiliza para definir el desfase mínimo. Al calcular autocorrelaciones debe realizarse de forma estática, esto significa que sólo se tendrán en cuenta los desplazamientos temporales en la ventana [*-dt_minlag*, *dt_minlag*]
- Largo de la ventana de retardo *dt_width* determina la anchura de la ventana de retardo.
- Lados a utilizar *dt_sides* el valor ambos indica que el análisis se realizará en las partes causales (tiempos de retardo positivos) y acausales (tiempos de retardo negativos) de las funciones de correlación.
- El parámetro *dt_mincoh*, indica la coherencia mínima que se pudo haber obtenido durante el procedimiento MWCS, a los datos menores se les asigna un valor de 0 y no se utilizan durante el análisis *dt*.
- El parámetro *dt_maxerr* especifica el error máximo que se pudo haber obtenido durante el procedimiento MWCS, los valores mayores no se utilizan en el análisis *dt*.
- Máximo valor dt *dt_maxdt* indica el valor máximo de retraso temporal que se pudo haber determinado durante el procedimiento MWCS, los valores mayores no se utilizan durante el cálculo de *dt*

La Tabla 6.9 muestra la selección de los parámetros anteriores para este trabajo.

La estimación de dt/t se realiza mediante una regresión lineal ponderada (WLS) aplicada a los retardos en función de los desfases temporales. Primero, se seleccionan los datos considerando que *dt_minlag* = 5 s y *dt_width* = 30 s con *dt_sides* en ambos lados, lo que implica analizar desfases en el rango de 5 a 35 s, en los tiempos tiempos de retardo positivos y negativos de las CCFs.

Parámetro	Valor
Tiempo de retardo mínimo (dt_{minlag})	5 s
Criterio de desfase temporal (dt_{lag})	Estática
Largo de la ventana de retardo (dt_{width})	30 s
Lados a utilizar (dt_{sides})	Ambos
Coherencia mínima (dt_{mincoh})	0.65
Error máximo (dt_{maxerr})	0.1
Máximo valor dt (dt_{maxdt})	0.1

Tabla 6.9: Parámetros de configuración para el cálculo de desfases temporales

Luego, se aplican filtros adicionales para descartar datos que no cumplan con los umbrales de coherencia mínima (dt_{mincoh}), error máximo permitido (dt_{maxerr}) y retardo máximo aceptable (dt_{maxdt}). Con los datos válidos, se realizan dos regresiones lineales ponderadas (WLS):

1. Primera regresión (*Forced WLS*): Se fuerza a que la recta pase por el origen (0,0), obteniendo la pendiente M_0 y su error EM_0 .
2. Segunda regresión (*Not Forced WLS*): Se permite que la recta tenga una ordenada al origen distinta de cero, introduciendo una constante A. De esta regresión se obtiene una nueva pendiente M y su error EM, junto con la constante A y su error EA.

La razón para permitir que la WLS cruce el eje en un punto distinto de (0,0) es, por ejemplo, estudiar posibles variaciones en la posición de la fuente de ruido (Lecocq, 2019). En este trabajo se utiliza la segunda regresión, por lo que el gráfico de variaciones en la velocidad muestra los resultados de la regresión utilizando una constante, reflejando estos posibles efectos adicionales.

7.1. Gráficos de las funciones de correlación

El gráfico de las funciones de correlación en el tiempo muestra el tiempo de retardo en el eje horizontal, y la evolución temporal de los datos utilizados en el eje vertical. El gráfico se divide en dos secciones: el lado acausal, que corresponde a los tiempos de retardo negativos, y el lado causal, que abarca los tiempos de retardo positivos. Cada línea corresponde a la función de correlación resultante del apilamiento de datos en intervalos de n días. En este trabajo se realizaron apilamientos de 2, 5 y 10 días. Los incrementos en el valor de la correlación para distintos tiempos de retardo se observan como perturbaciones en los gráficos. Los distintos componentes de los gráficos de las funciones de correlación pueden observarse en la Figura 7.1

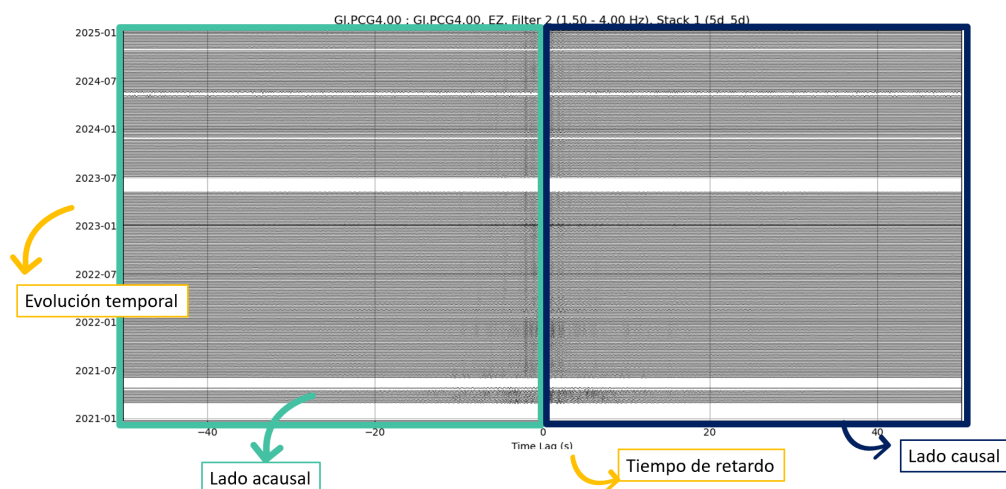


Figura 7.1: Explicación de un gráfico de funciones de correlación

Se calcularon las funciones de autocorrelación para las cinco estaciones descritas en la Tabla 6.3 utilizando las mismas componentes (EE, NN, ZZ) y también las componentes cruzadas (EN, EZ, NZ). Además, para el procesamiento se utilizaron los filtros descritos en la Tabla 6.5, por lo que para cada combinación de componentes se obtuvieron tres conjuntos de funciones de correlación. Los datos fueron apilados linealmente en los tres intervalos de tiempo previamente descritos, generando un total de nueve conjuntos de gráficos para cada combinación de componentes y filtro aplicado.

Según la Tabla 6.1 y la Tabla 6.2 la autocorrelación de la señal debería mostrar una diferencia en los patrones de correlación entre los periodos pre-eruptivo, eruptivo y post-eruptivo. Durante los periodos pre-eruptivo y eruptivo la actividad volcánica se mantuvo constante, siendo más intensa durante este último, mientras que durante el periodo post-eruptivo el volcán entró en inactividad.

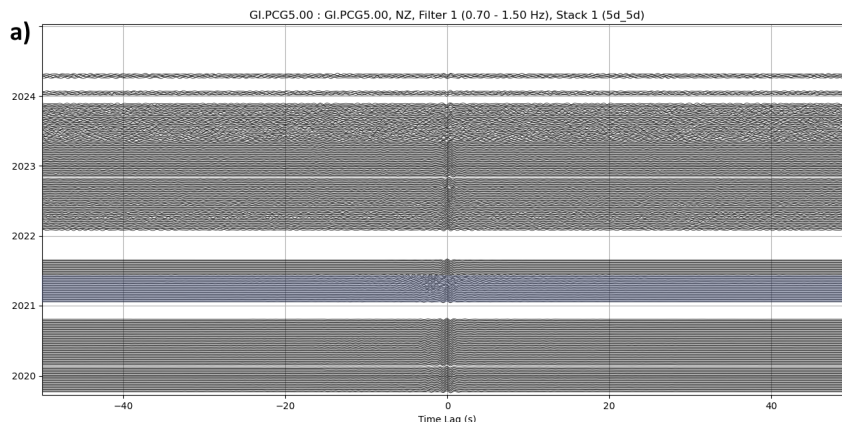
Se compararon las funciones de correlación de cada estación y componente, para los tres filtros indicados en la Tabla 6.5

En esta sección se presentan únicamente los gráficos de las funciones de correlación de las estaciones PCG2, PCG4 y PCG5, con apilamiento de 5 días, utilizando los tres filtros (0.7 - 1.5 Hz, 1.5 - 4.0 Hz, 4.0 - 8.0 Hz) para las componentes NZ y EE a manera de ejemplos ilustrativos. Se eligieron estas estaciones por ser las que se encontraban activas durante el periodo eruptivo. Las componentes se eligieron para mostrar cómo diferentes combinaciones de componentes de la misma estación pueden representar de distinta manera el mismo periodo eruptivo. Sin embargo, el análisis se realizó para todas las estaciones y componentes. El resto de gráficos pueden encontrarse en la sección de Anexos.

7.1.1. Gráficos de las funciones de correlación para PCG5

Componentes NZ

En la Figura 7.2 se aprecian mayores dispersiones en los periodos pre-eruptivo y eruptivo al aumentar la frecuencia de los filtros. En a) en el transcurso del periodo pre-eruptivo se mantuvo un patrón en la correlación en la parte acausal del gráfico, en un tiempo de retardo de 3 s. Este se intensifica durante los últimos meses del periodo eruptivo. Durante los años 2022-2024 se observan cambios en la correlación, sin embargo, estos no tienen un patrón claro. En b) y c) se observa una buena consistencia entre las regiones con aumento en la correlación y las etapas pre-eruptiva y eruptiva. Durante el periodo pre-eruptivo, se observa correlación en tiempos de retardo mayores, alrededor de 7.5 s, mientras que en la etapa eruptiva, esta se manifiesta aproximadamente a los 5 s.



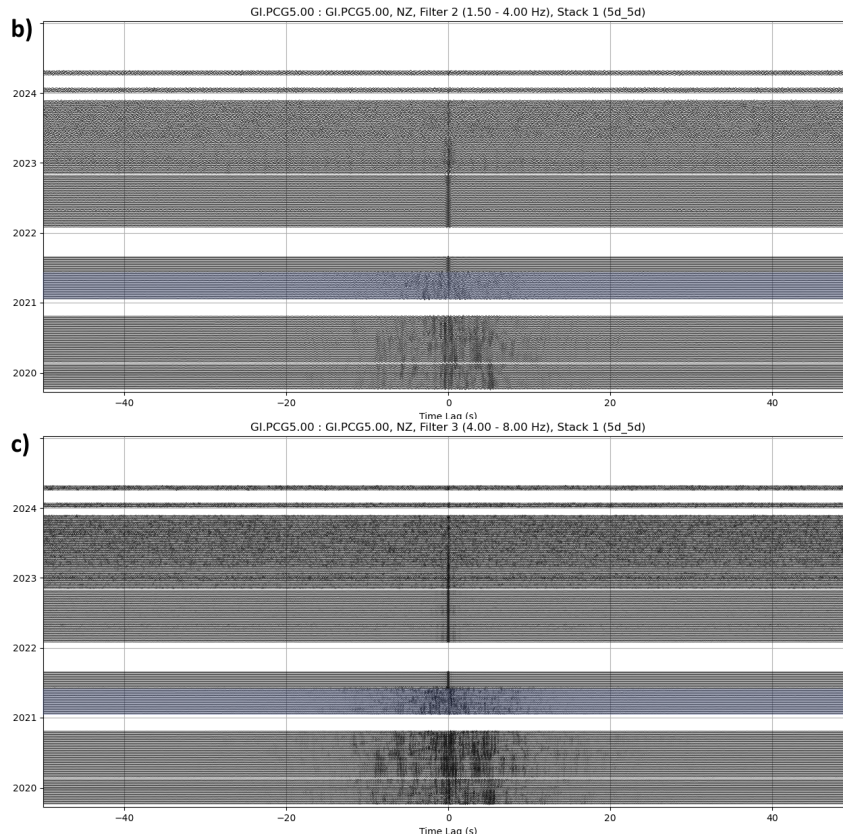


Figura 7.2: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NZ (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

Componentes EE

En la autocorrelación de las componentes EE (Figura 7.3), son menos notorios los cambios en las correlaciones antes y después del periodo de actividad, incluso al utilizar diferentes filtros. En a) se observa una ligera variación durante el periodo eruptivo, con la correlación extendiéndose a tiempos de retardo de 7.5 s. Esto es más evidente en marzo y a finales de mayo de 2021. Luego, el gráfico muestra una constante falta de correlación para tiempos de retardo alejados de cero. En b) se observa un leve patrón en las variaciones de correlación para un tiempo de retardo de 5 s, el cual se mantiene a lo largo de la etapa pre-eruptiva. Durante la etapa eruptiva, se percibe una ligera variación en la correlación en marzo de 2021; sin embargo, no se identifican patrones significativos. En c) no se observa ningún cambio significativo durante los periodos pre-eruptivo y eruptivo.

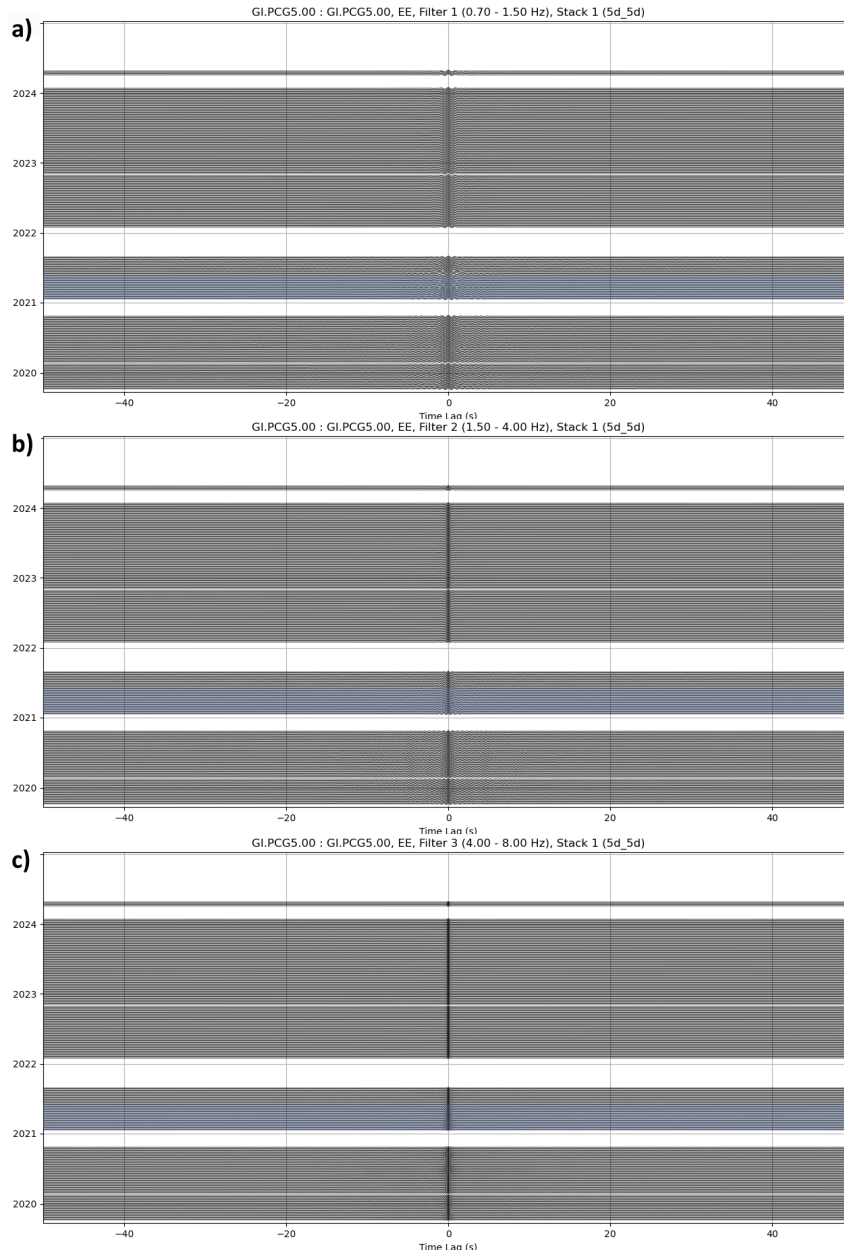


Figura 7.3: Gráfico de funciones de autocorrelación de las componentes EE (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

7.1.2. Gráficos de las funciones de correlación para PCG2

Componentes NZ

Analizando las funciones de correlación para las componentes cruzadas NZ de la estación PCG2, mostradas en la Figura 7.4, se identifican diferentes patrones de correlación. En a), hay variaciones en la correlación durante el periodo eruptivo, siendo predominantes en un tiempo de retardo de 5 s del lado causal. Se mantienen patrones en la correlación a lo largo del periodo post-eruptivo, observándose en tiempos de retardo cortos, entre 2.5 s y 5 s, variando entre el lado causal y acausal.

En b) también se observan patrones de correlación por temporadas durante el periodo post-eruptivo, manteniéndose en tiempos de retardo de 5 s y 8 s. Sin embargo, es mucho más notorio el cambio entre el periodo eruptivo y el post-eruptivo. Durante el periodo eruptivo se distinguen mayores cambios en la correlación notándose en tiempos de retardo de hasta 15 s. En c) se observa el mismo patrón durante el periodo eruptivo, con correlaciones en tiempos de retardo de 15 s. La correlación durante el periodo post-eruptivo se manifiesta en tiempos de retardo menores a 5 s.

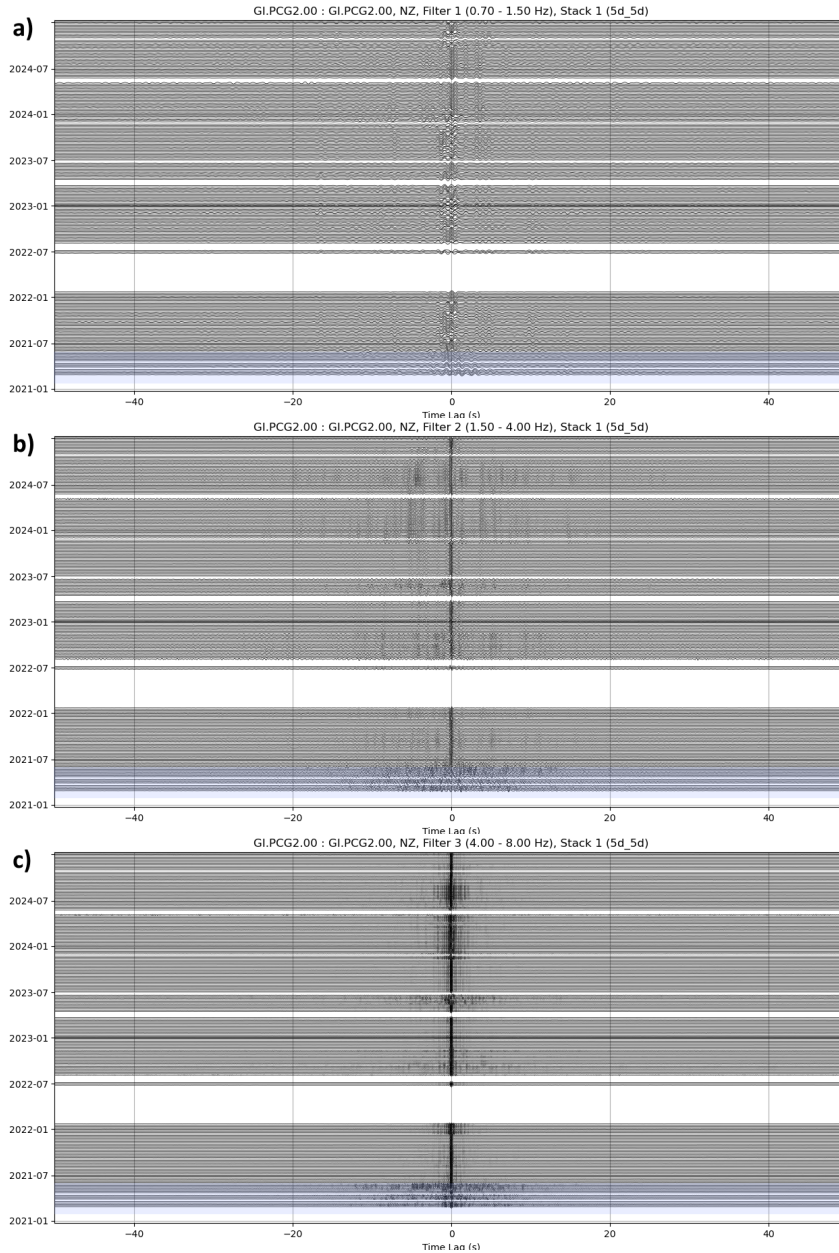


Figura 7.4: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NZ (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

Componentes EE

Analizando la Figura 7.5, a) muestra un cambio en la correlación durante marzo de 2021, extendiéndose hasta los 50 s. En a) y b), durante el periodo post-eruptivo, se dan correlaciones ocasionales en tiempos de retardo de 2.5 s a 7 s, sin contar con un patrón específico. En c) no se observan cambios significativos ni patrones de correlación durante los periodos eruptivo y post-eruptivo.



Figura 7.5: Gráfico de funciones de autocorrelación de las componentes EE (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

7.1.3. Gráficos de las funciones de correlación para PCG4

Componentes NZ

En la Figura 7.6 a) se observa un patrón de correlación entre los tiempos de retardo 3 s y 1.5 s durante el periodo eruptivo. Durante el periodo post-eruptivo se perciben patrones constantes en la correlación en diferentes tiempos de retardo, siendo predominantes a los 1 s y 2.5 s, principalmente en el lado acausal del gráfico. En b), durante la etapa eruptiva, la correlación presenta aumentos leves en los tiempos de retardo de 5 s y 10 s. En los años luego del periodo de actividad se advierte un patrón de correlación en un tiempo de retardo de 0.5 s, principalmente del lado causal. Patrones menos marcados se observan en tiempos de retardo de 3 s y 5 s.

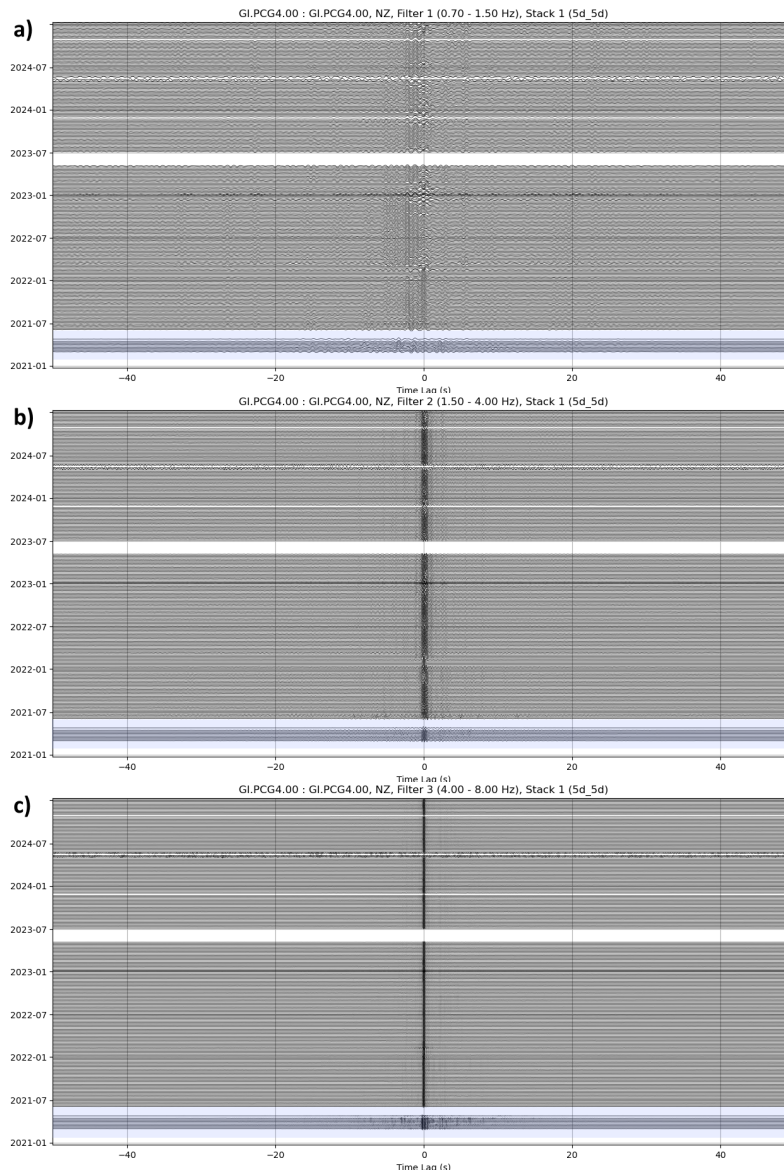


Figura 7.6: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NZ (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

En c) se muestran variaciones en la correlación más marcadas durante el periodo eruptivo. Estas se observan en tiempos de retardo de 2.5 s, 4.5 y 6.0 s. En el resto del tiempo, permanece un patrón ligero en un tiempo de retardo de 5 s.

Componentes EE

En a), b) y c) de la Figura 7.7, correspondientes a la autocorrelación de las componentes EE de la estación PCG4 no se observa ningún patrón significativo en la correlación.

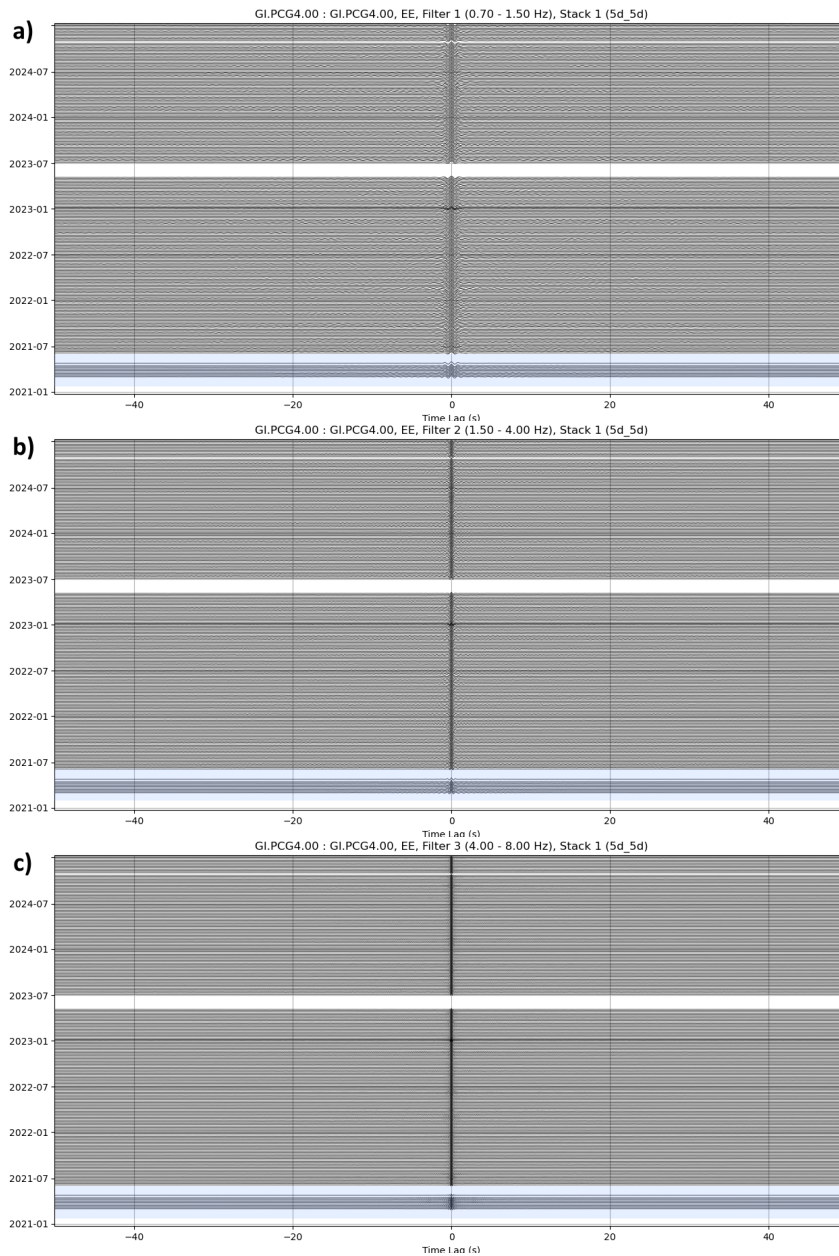


Figura 7.7: Gráfico de funciones de autocorrelación de las componentes EE (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

7.2. Interferogramas

El software permite visualizar las funciones de correlación en el tiempo de forma similar a los gráficos de la sección anterior, sustituyendo las ondulaciones por colores. Las zonas coloreadas indican una mayor correlación. Dado que las regiones sin un aumento en la correlación no presentan color en el gráfico, los interferogramas facilitan la identificación de las áreas donde sí se observa dicho aumento en tiempos de retardo determinado.

7.2.1. Interferogramas para PCG5

Componentes NZ

En a), b) y c) de la Figura 7.8, durante los periodos pre-eruptivo y eruptivo, se observa correlación en tiempos de retardo más largos, de hasta 20 segundos. En contraste, durante algunos meses del periodo post-eruptivo, la correlación cambia y se concentra en tiempos de retardo de hasta 10 s. Los patrones de correlación son más marcados al utilizar una banda de frecuencia menor.

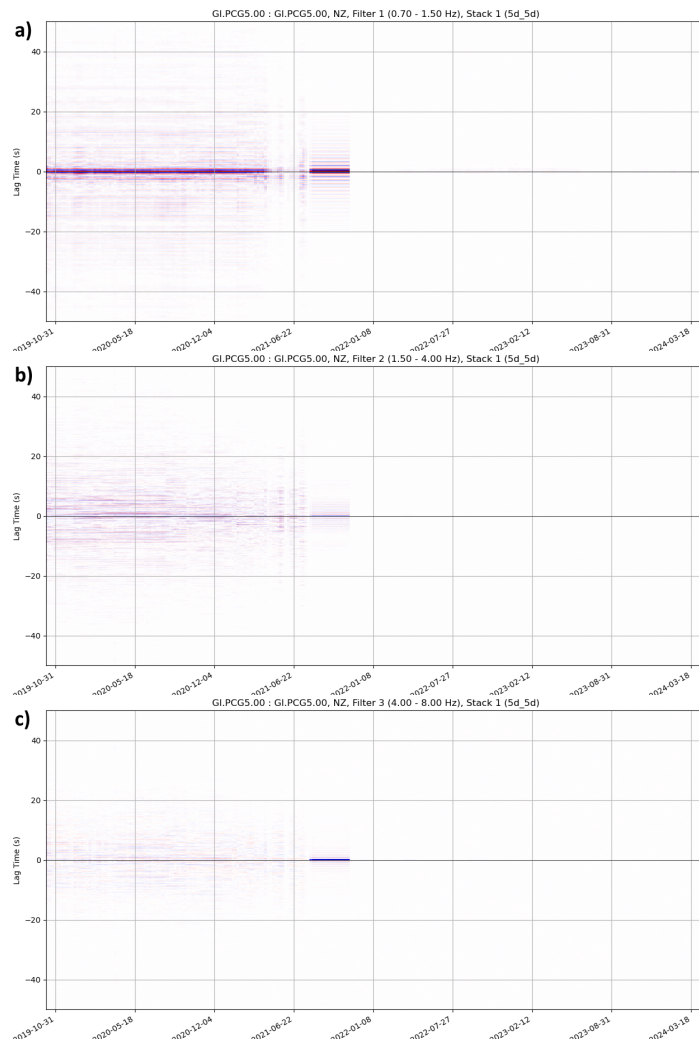


Figura 7.8: Interferograma de las componentes cruzadas NZ (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

Componentes EE

La Figura 7.9 muestra los interferogramas de las componentes (EE) para la estación PCG5 utilizando diferentes filtros. En a) se observa un ligero patrón de correlación durante el periodo pre-eruptivo alrededor de un tiempo de retardo de 5 s. Durante marzo-mayo de 2021 se observa un aumento drástico en la correlación en tiempos de retardo de hasta 15 s. Luego, durante 2 meses del periodo post-eruptivo, se observa correlación en tiempos de retardo menores, cercanos a 5 s. En b) también se observa un ligero patrón durante los meses del periodo pre-eruptivo. Para el periodo eruptivo, la correlación se extiende a tiempos de retardo mayores, destacándose en marzo y mayo de 2021, cuando alcanza aproximadamente 30 segundos. No se observa correlación relevante en el periodo post-eruptivo. En c) se observa un ligero patrón de correlación en tiempos de retardo de 5 s a 10 s en el periodo eruptivo, y se intensifica solamente durante mayo de 2021, cuando alcanza tiempos de retardo de aproximadamente 15 s.

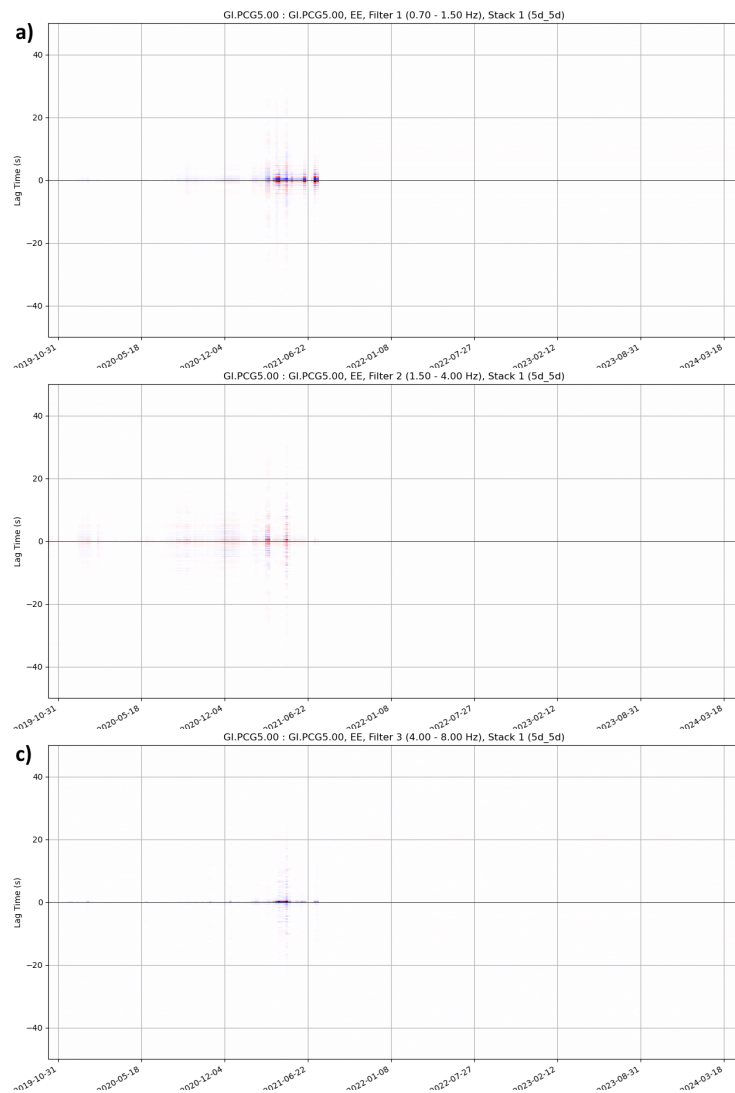


Figura 7.9: Interferograma de las componentes EE (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

7.2.2. Interferogramas para PCG2

Componentes NZ

La Figura 7.10 muestra mayores variaciones al utilizar menores frecuencias. a) muestra un ambiente mucho más ruidoso, puesto que se observan variaciones en la correlación durante casi todo el tiempo de retardo y para todos los datos analizados. Durante la etapa post-eruptiva se observan patrones en la correlación en los tiempos de retardo 2.5 s, 5.0 s, 15 s. Sin embargo, se observan correlaciones constantes mayores durante la etapa eruptiva para los tiempos de retardo 10 s, 16 s, 22 s, 27 s y 41 s. En b) persisten con menos intensidad los patrones en la etapa eruptiva y post-eruptiva. En c) se observa una disminución en los valores de correlación. Durante la etapa eruptiva se encuentran patrones en la correlación en tiempos de retardo de 5 s y 10 s. En la etapa post-eruptiva, estos se observan en tiempos de retardo de 1.5 s.

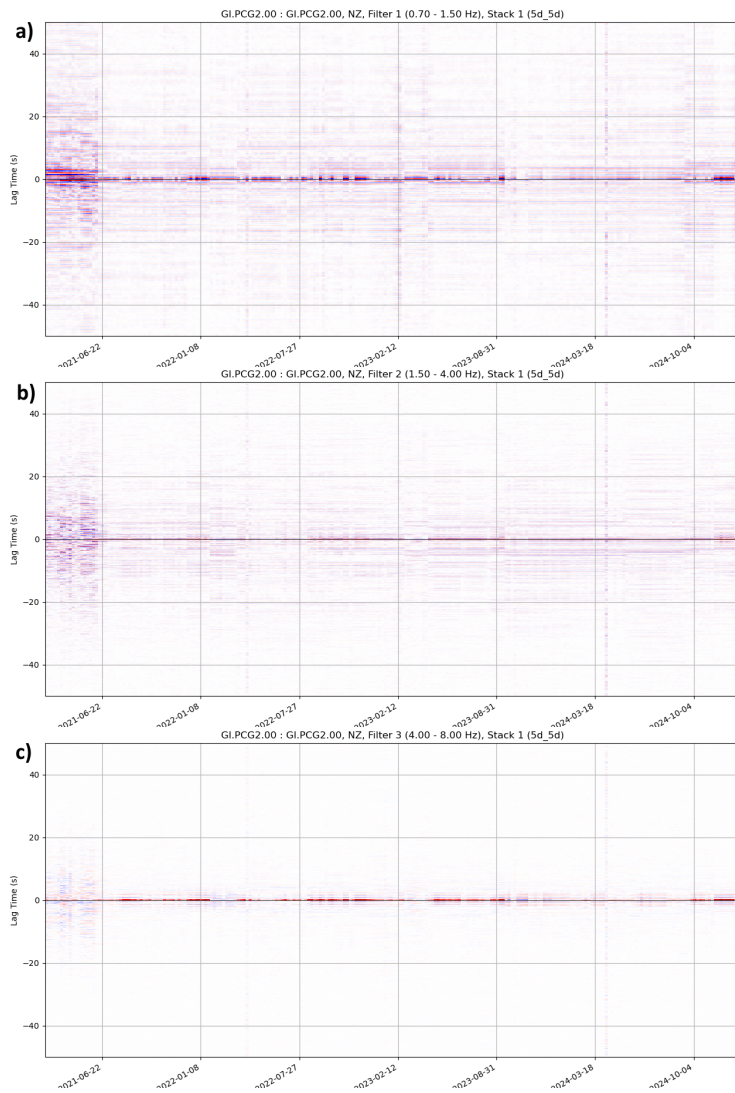


Figura 7.10: Interferograma de las componentes cruzadas NZ (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

Componentes EE

En a), b) y c) de la Figura 7.11 se observa un aumento en la correlación durante los primeros meses de la etapa eruptiva (febrero y marzo de 2021), siendo mucho más notable utilizando el primer filtro. Al utilizar el segundo y tercer filtro se observa otra zona con un aumento leve en la correlación durante abril 2021. Solamente en c) se presentan correlaciones en la etapa post-eruptiva, con aumentos ocasionales, sin observarse ningún patrón.

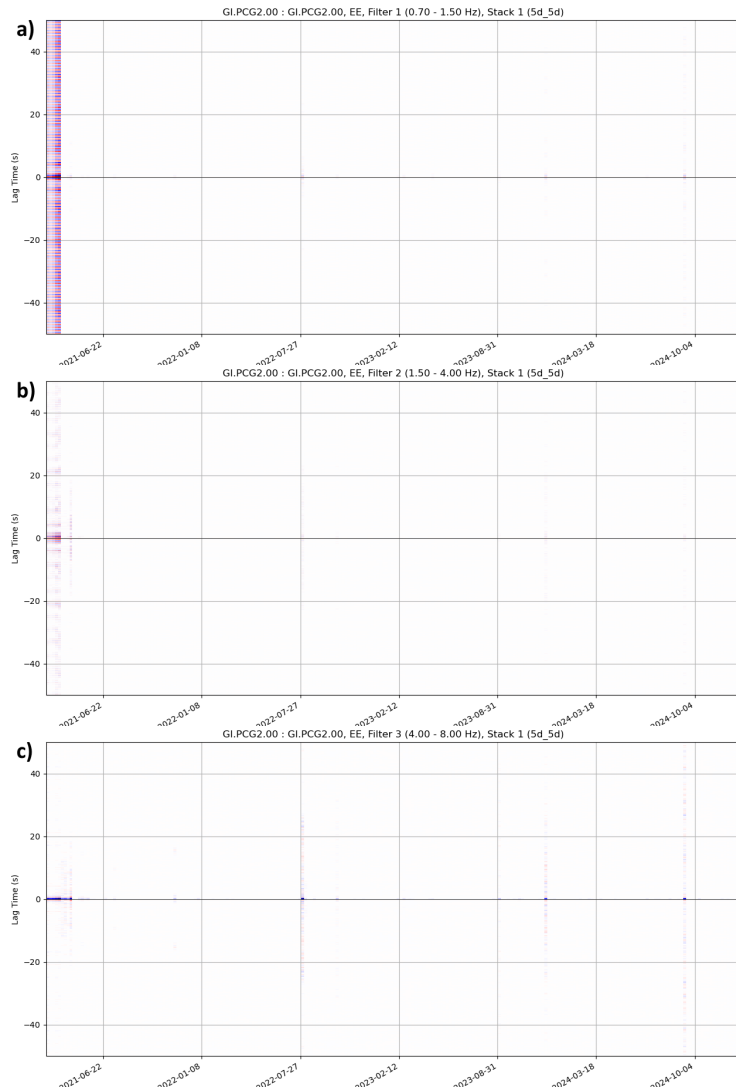


Figura 7.11: Interferograma de las componentes cruzadas EE (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

7.2.3. Interferogramas para PCG4

Componentes NZ

Las variaciones en las correlaciones analizando las componentes NZ de la estación PCG4 (Figura 7.12) muestran un aumento al utilizar una banda de frecuencia menor. En a) se observa una gran

cantidad de correlaciones a lo largo de todo el gráfico. Destaca una diferencia entre los primeros meses de la etapa eruptiva (febrero a abril de 2021) y el resto del tiempo. Durante estos meses, la correlación se mantiene constante en tiempos de retardo de 3, 5, 9, 13, 15, 20 y 26 segundos. En contraste, para el resto del periodo, las correlaciones se registran en 2, 7, 16 y 22 segundos, aunque con una intensidad significativamente menor. En b) y c) se sigue observando la diferencia entre los primeros meses del periodo eruptivo y el resto del tiempo. Durante los meses de febrero a abril de 2021 se observa correlación en tiempos de retardo de hasta 20 s. Para el resto del tiempo se observan patrones mucho más débiles cercanos al tiempo de retardo 0.

En a), b) y c) durante abril de 2024, se observa una franja que indica distintos valores de correlación en todos los tiempos de retardo. Esto podría deberse a un fallo en el sensor, ya que, pocos días antes, presentó un comportamiento anómalo dejando de funcionar temporalmente. Esto también logra observarse en el gráfico de las funciones de correlación. En los gráficos del espectro de las funciones de correlación cruzada (Figura 12.20), es esta región se observan frecuencias no coherentes e inconsistentes con el resto de valores.

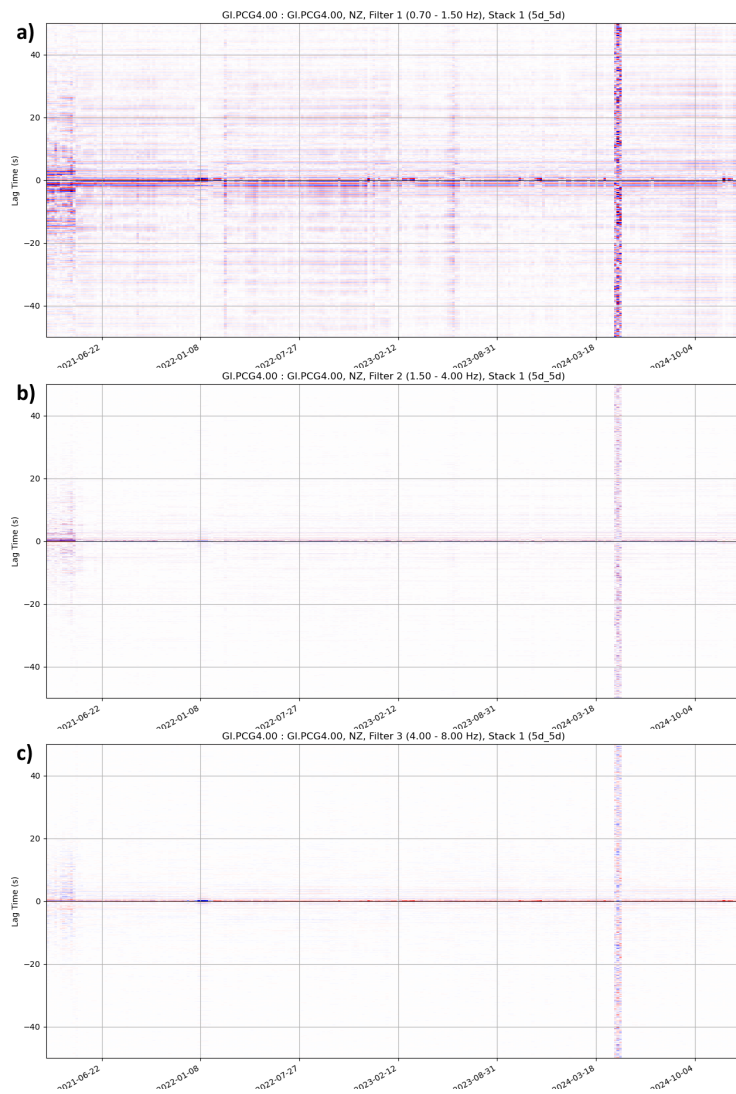


Figura 7.12: Interferograma de las componentes cruzadas NZ (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

Componentes EE

En a), b) y c) de la Figura 7.13, se observan ligeros aumentos en la correlación durante los primeros meses de la etapa eruptiva (febrero a abril de 2021). En abril de 2021, la correlación se extiende a tiempos de retardo de hasta 20 segundos, mientras que entre febrero y marzo se mantiene en 10 segundos. Se observan dos franjas de correlación en febrero de 2022 y enero de 2024. Sin embargo, no se ha identificado una posible fuente para estas, ya que no aparecen en las gráficas de correlación y el sensor funcionó sin interrupciones durante esos periodos.

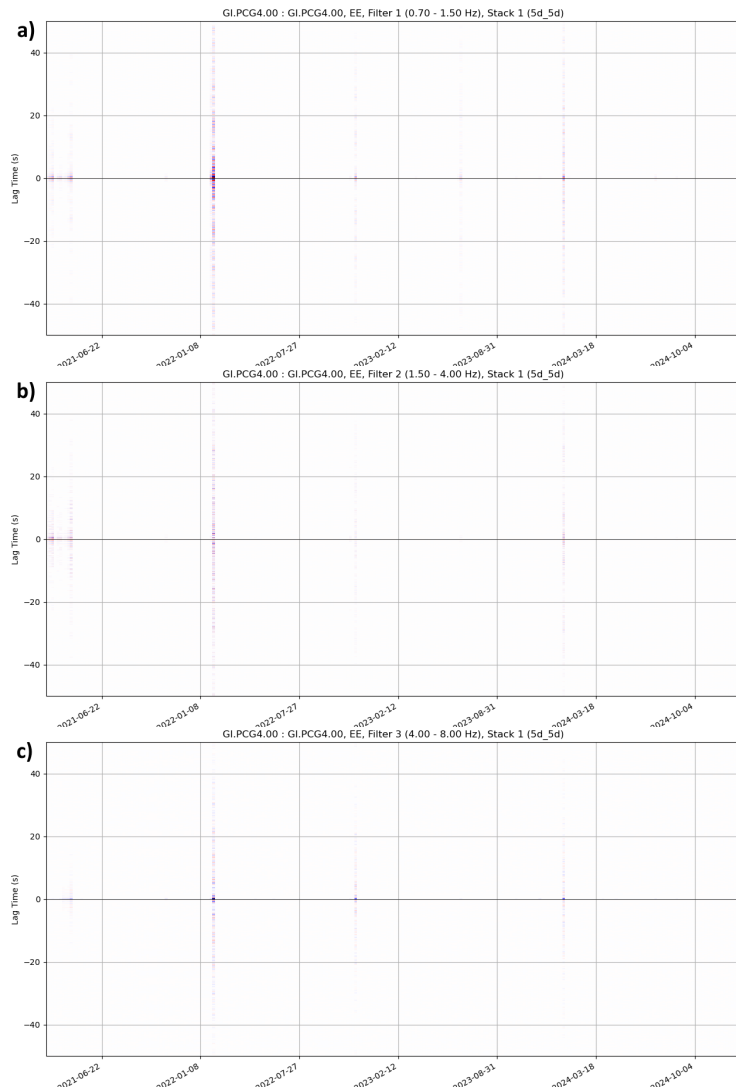


Figura 7.13: Interferograma de las componentes cruzadas EE (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

7.3. Gráficos de coherencia y desfase temporal relativo

Dados los resultados obtenidos graficando las funciones de correlación para las distintas estaciones y componentes, se seleccionó el filtro 2, ya que fue con el que se logró observar mejores coincidencias entre los aumentos en la correlación y los periodos pre-eruptivo y eruptivo. Además, en las etapas

subsiguientes, se utilizará únicamente con la estación PCG5 (banda ancha y periodo corto), ya que es la única con datos del periodo pre-eruptivo, permitiendo un análisis más completo.

En cada una de las figuras de coherencia y desfase temporal (figuras 7.15, 7.16, 7.17, 7.18, 7.19 y 7.20) se observan 4 gráficos:

- Mapa de colores para el desfase temporal relativo
 - Muestra la variación del desfase temporal (dt) en función del tiempo y del tiempo de retardo ($lag\ time$).
 - Los colores representan cambios en el desfase (dt), donde el rojo indica valores positivos y el azul valores negativos.
- Mapa de colores para la coherencia media
 - Representa la coherencia media de las señales a lo largo del tiempo y del tiempo de retardo ($lag\ time$).
 - La escala de colores va de negro a amarillo, donde los valores más altos (amarillo) indican mayor coherencia en la señal.
- Curva tiempo de retardo vs desfase temporal relativo
 - Muestra el promedio de los valores de desfase relativo (dt) para distintos tiempos de retardo ($lag\ time$).
 - La línea negra indica la tendencia de dt en función del $lag\ time$ y la línea roja punteada representa un umbral de referencia.
- Curva tiempo de retardo vs coherencia media
 - Muestra cómo varía la coherencia media con respecto al tiempo de retardo ($lag\ time$).
 - La línea negra representa la coherencia promedio y la línea roja punteada establece un umbral de referencia.

En la Figura 7.14 se puede observar de manera detallada dónde se encuentra cada una de las gráficas.

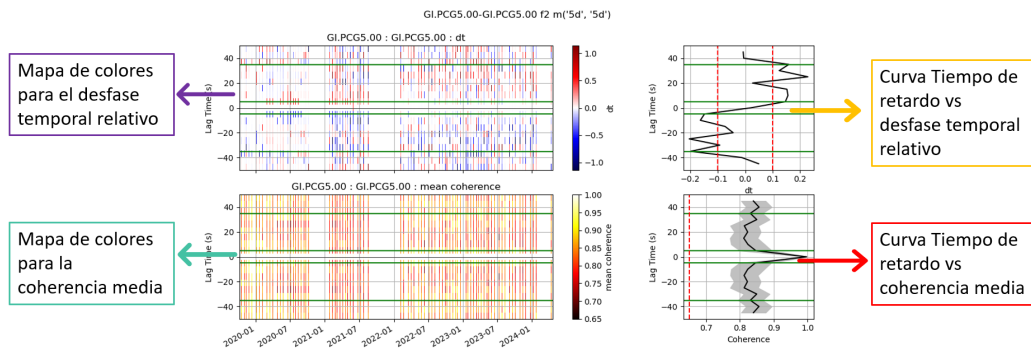


Figura 7.14: Desglose de los gráficos de coherencia y desfase temporal

En el caso de las componentes EE en la Figura 7.15, se observan coherencias medias mayores durante los periodos pre-eruptivo y post-eruptivo, especialmente en tiempos de retardo de aproximadamente 20 y 40 segundos. Los desfases temporales son menores en el periodo pre-eruptivo, existiendo principalmente en tiempos de retardo menores a 10s. En el periodo eruptivo, los desfases

temporales se mantienen en tiempos de retardo menores a 10s, pero también se observan en tiempos de retardo de 30-40 segundos. En la etapa post-eruptiva los desfases temporales son más notorios en tiempos de retardo mayores a 15 segundos. La coherencia media se mantiene en un rango de 0.70 a 0.85. Mayores tiempos de retardo muestran mayores desfases temporales relativos.

Las componentes EN en la Figura 7.16 muestran una mayor coherencia y menores desfases temporales durante el periodo pre-eruptivo, siendo hasta julio de 2020 que comienzan a observarse desfases temporales en tiempos de retardo mayores a 20 segundos. El periodo eruptivo muestra menores valores de coherencia. El periodo post-eruptivo muestra altos valores de coherencia en un tiempo de retardo de 30 segundos, y desfases temporales en tiempo de retardo de 20 segundos. Las coherencias medias para los tiempos de retardo permanecen en un intervalo de 0.70 a 0.85. Los desfases temporales son mayores en tiempos de retardo de -20 segundos.

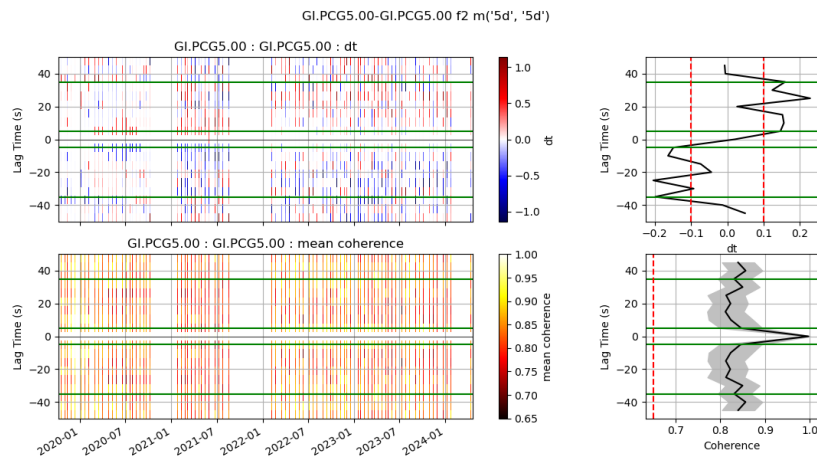


Figura 7.15: Gráficos de coherencia media y desfases temporales relativos para PCG5 analizando los componentes EE

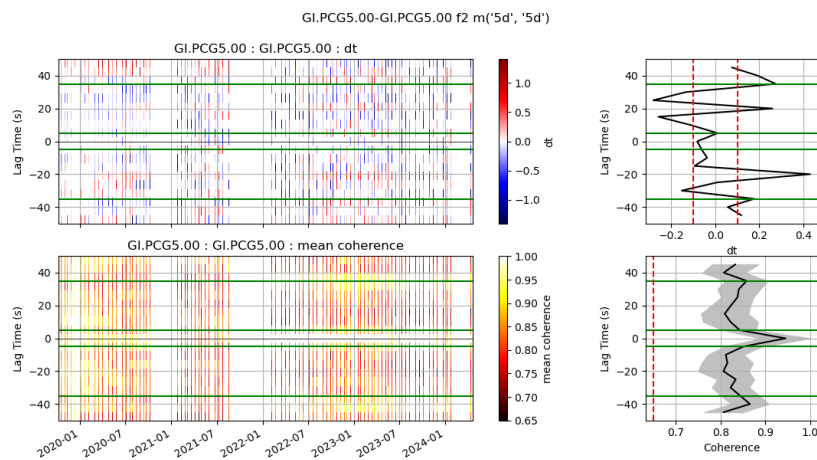


Figura 7.16: Gráficos de coherencia media y desfases temporales relativos para PCG5 analizando los componentes EN

La Figura 7.17 muestra el análisis para las componentes EZ. Durante el periodo pre-eruptivo las coherencias medias son mayores, con menos desfases temporales. En los meses del periodo eruptivo los tiempos de retardo de 20 a 30 segundos presentan mayores coherencias, los desfases temporales

son más notorios en tiempos de retardo menores a 20 segundos y mayores a 30 segundos. El periodo post-eruptivo presenta desfases temporales relativos constantes en un tiempo de retardo de 10s. La coherencia media promedio para los datos se mantiene en un intervalor de 0.70 a 0.85. Los mayores desfases temporales ocurren en los tiempos de retardo -35, -10 -5 y 20 segundos.

Las coherencias y desfases temporales relativos de las componentes NN se observan la Figura 7.18. En el periodo pre-eruptivo se observan coherencias medias mayores en tiempos de retardo menores a 10 segundos y en los cercanos a 40 segundos. El periodo eruptivo muestra coherencias menores con desfases temporales relativos en casi todos los tiempos de retardo. Una diferencia notable en las coherencias medias y desfases temporales ocurre en el periodo post-eruptivo: se observan coherencias cercanas a 1 y menos desfases temporales. El promedio de la coherencia media se mantiene en un intervalo de 0.85 a 0.9. Los mayores desfases temporales ocurren en tiempos de retardo de -30, -10, 10 y 30 segundos.

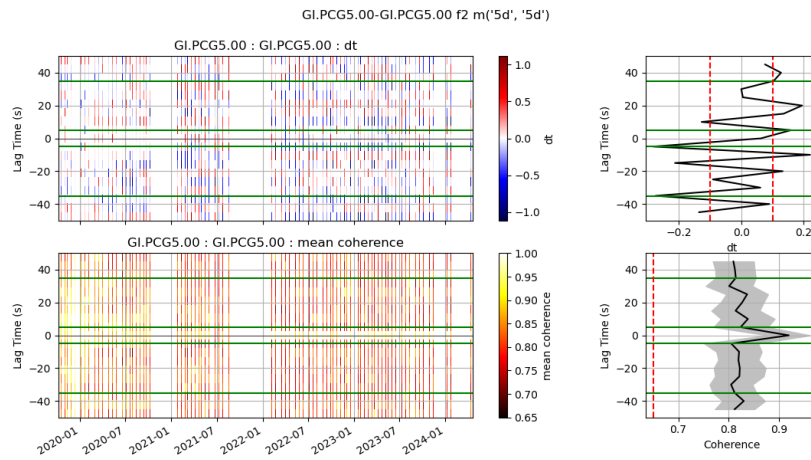


Figura 7.17: Gráficos de coherencia media y desfases temporales para PCG5 analizando los componentes EZ

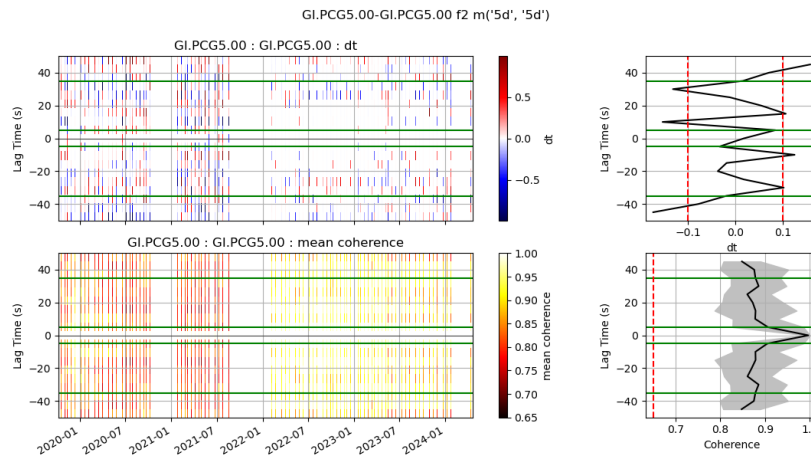


Figura 7.18: Gráficos de coherencia media y desfases temporales para PCG5 analizando los componentes NN

La Figura 7.19 muestra el análisis para las componentes NZ. El periodo pre-eruptivo muestra coherencias mayores y menos desfases temporales relativos, con un cambio en julio de 2020, donde

se encuentran desfases temporales relativos en distintos tiempos de retardo. Este comportamiento continúa en la fase eruptiva. Luego del periodo eruptivo, se observan algunas zonas con mayores coherencias medias. El promedio de la coherencia media se encuentra en un rango de 0.70 a 0.85. Los mayores desfases temporales ocurren en los tiempos de retardo -40, 35 y 40 segundos.

Para las componentes ZZ en la Figura 7.20, se observa una mayor coherencia durante el periodo pre-eruptivo y menores desfases temporales. Durante la etapa eruptiva, las coherencias son mayores alrededor de un tiempo de retardo de 20 segundos en las partes causal y acausal del gráfico, teniendo mayores desfases en tiempos de retardo alrededor 20 y 30 segundos, de ambos de lados del gráfico. En el periodo post-eruptivo se observa un ligero aumento en las coherencias medias, principalmente desde el inicio de 2023. Sin embargo, los desfases temporales son ocasionales. Los valores promedio de coherencia media se encuentran en un rango de 0.8 a 0.85. Se observan grandes cambios en los desfases temporales.

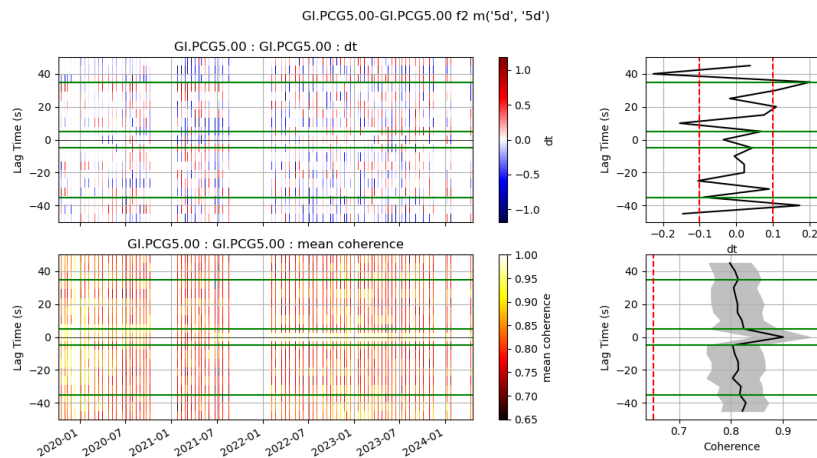


Figura 7.19: Gráficos de coherencia media y desfases temporales para PCG5 analizando los componentes NZ

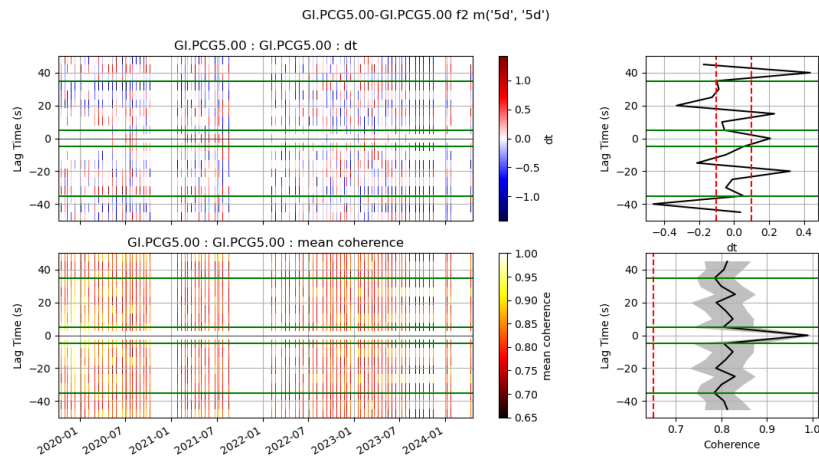


Figura 7.20: Gráficos de coherencia media y desfases temporales para PCG5 analizando los componentes ZZ

7.4. Variaciones de velocidad relativa

En la Figura 7.21 se muestra el promedio de las variaciones en la velocidad relativa de todas las combinaciones de componentes de la estación PCG5 para apilamientos de 2, 5 y 10 días. Con amarillo se subraya el periodo eruptivo (febrero 2021 - mayo 2021). La línea azul indica el promedio de las variaciones de velocidad, mientras que la línea anaranjada muestra la media ponderada, la cual utiliza los pesos calculados durante el análisis de MWCS.

Se observa en la Figura 7.21 que la resolución de las variaciones varía según el apilamiento utilizado. El cambio en las velocidades durante la etapa eruptiva es más evidente en los apilamientos de 5 y 10 días. Los cambios promedio en la velocidad relativa muestran mayor variabilidad que los obtenidos utilizando la media ponderada. Por ello, se emplearán los valores de la media ponderada para describir las variaciones en la velocidad relativa.

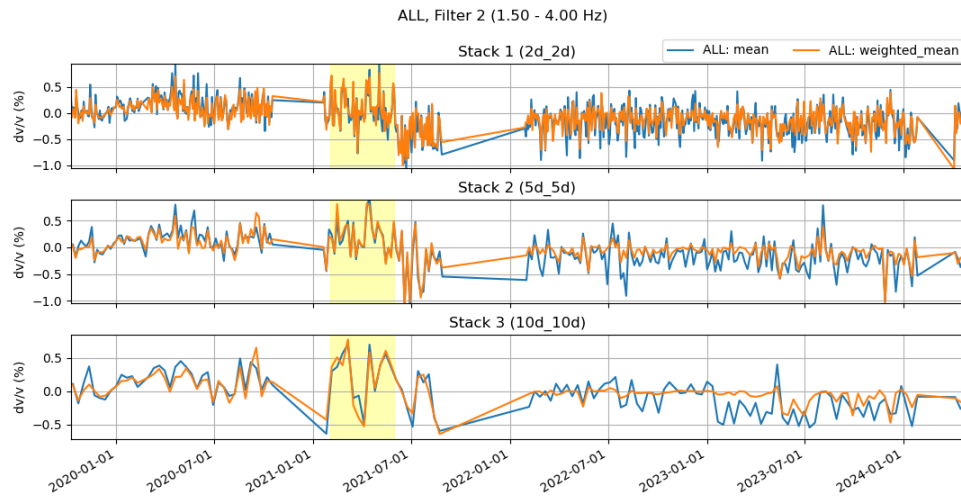


Figura 7.21: Gráficos de variaciones en la velocidad relativa utilizando un promedio de todas las variaciones de componentes de la estación PCG5 utilizando apilamientos de 2, 5 y 10 días

En el apilamiento de 2 días los cambios son con mayor frecuencia. Los primeros meses de la etapa pre-eruptiva muestran una ligera tendencia creciente, con fluctuaciones de dv/v entre -0.2% y 0.4% , con un máximo a finales de abril de 2020, alcanzando un valor de 0.6% . Durante la etapa eruptiva se observan picos más pronunciados con variaciones de 0.65% , 0.70% y 0.70% . Las variaciones se mantienen en su mayoría positivas. Los primeros meses luego de la erupción presentan un descenso notable en amplitud de las variaciones de la velocidad relativa, alcanzando valores de -1.0% y -0.8% . El resto de la etapa post-eruptiva continúa con variaciones principalmente negativas, manteniéndose principalmente en valores cercanos a -0.20% con picos ocasionales de -0.6% .

Utilizando el apilamiento de 5 días se observa que, durante los primeros meses de la etapa pre-eruptiva, las variaciones en la velocidad son moderadas, con valores máximos de dv/v de -0.2% y 0.35% . Sin embargo la mayoría de variaciones se encuentran dentro del 0.2% . No es hasta finales de abril de 2020 que se observa un aumento, alcanzando un valor de 0.6% . Los siguientes meses del periodo pre-eruptivo muestran mayores picos, alcanzando variaciones de 0.65% y -0.25% durante los meses de agosto y septiembre del 2020. La mayoría de las variaciones a partir mayo de 2020 se encuentran dentro del 0.4% . Días antes del inicio del periodo eruptivo se observa un decaimiento en la velocidad relativa con un valor de -0.4% . Durante la etapa eruptiva (zona amarilla) se observan picos mucho más pronunciados en las variaciones positivas, alcanzando variaciones de

0.70% y 0.82% durante los meses de febrero y abril, respectivamente. El resto de datos de esta etapa muestran variaciones principalmente positivas entre 0.5%. Los primeros meses de la etapa post-eruptiva muestran un claro descenso en las velocidades sísmicas relativas alcanzando valores cercanos al -1.0%, las variaciones siguen mostrándose de forma pronunciada. Los siguientes meses de la etapa post-eruptiva se muestran más estables, manteniéndose en variaciones negativas cercanas a -0.20% y -0.30%. Se presentan algunos picos atípicos a finales de 2023.

El apilamiento de 10 días muestra variaciones en la velocidad más marcadas. Los meses de la etapa pre-eruptiva se encuentran en su mayoría en un rango de -0.2% a 0.4%, con un pico durante septiembre de 2020 alcanzando un valor de 0.65%. Durante la etapa eruptiva se observan cambios notablemente más abruptos. Las variaciones se dan en un intervalo de $[-0.4\%, 0.6\%]$, manteniéndose principalmente en valores positivos. El mayor pico durante la etapa eruptiva se encuentra durante marzo de 2021 con un valor de 0.77%. Durante la etapa post-eruptiva las variaciones se mantienen principalmente en valores negativos. Los primeros meses luego de la erupción se observa un descenso en las variaciones de la velocidad relativa, alcanzando valores de -0.65%. Durante el 2022 y los primeros meses del 2023 los datos presentan poca variabilidad, manteniéndose principalmente en un intervalo de -0.05% a 0.05%. A partir de mayo de 2023 se observa un decaimiento en las variaciones de velocidad relativa, manteniéndose en valores cercanos a -0.2% y -0.3%.

Discusión de resultados

La identificación de variaciones en la velocidad relativa del medio utilizando ruido sísmico ambiental durante los años 2019 a 2024 permite identificar los cambios en el comportamiento del medio antes, durante y después de un periodo de actividad volcánica del volcán de Pacaya.

Utilizando los boletines especiales de INSIVUMEH, los cuales describen la actividad eruptiva y efusiva del volcán, se determinaron los periodos en los que el volcán tuvo una fase eruptiva principal. Para facilitar el análisis se dividió el periodo de estudio en etapas pre-eruptiva (de diciembre 2019 a enero 2021), eruptiva (de febrero 2021 a mayo 2021) y post-eruptiva (de junio 2021 a diciembre 2024).

La utilización de diferentes bandas de frecuencia permitió observar el comportamiento de las señales analizadas con base en los gráficos de sus funciones de correlación e interferogramas. En general, al utilizar la banda de frecuencia de 0.7 Hz a 1.5 Hz, se observa una mayor asimetría entre las partes causal y acausal de las funciones, lo cual es un indicador que las ondas provenientes de fuentes locales tuvieron menos tiempo para realizar dispersión. Al utilizar frecuencias mayores para el procesamiento, con las bandas de frecuencia de 1.5 Hz a 4.0 Hz y de 4.0 Hz a 8.0 Hz, es notorio el aumento en la dispersión de las ondas, provocando una mayor simetría y cambios más marcados.

Las funciones de las componentes cruzadas demostraron tener más variaciones e información en las distintas etapas de actividad que las obtenidas con componentes repetidas, lo cual es consistente con el resultado reportado por [De Plaen et al. \(2016\)](#). Un ejemplo es la comparación de los resultados de las componentes (NZ) y (EE) de la estación PCG5 en las figuras [7.2](#) y [7.3](#). Los cambios en los patrones de correlación de las componentes NZ son mucho más marcados y notables, especialmente al utilizar mayores frecuencias. Sin embargo, especialmente con la ayuda de los interferogramas, se observa un aumento en las correlaciones durante las etapas pre-eruptiva y eruptiva, en comparación del resto de los datos. En varios de los gráficos se observan datos atípicos ya que no pueden asociarse a ningún tipo de actividad volcánica

En general, se considera que la banda de frecuencia 1.5 - 4.0 Hz permite observar mejores correlaciones entre los periodos de actividad y los patrones de correlación. La preferencia por las frecuencias mayores concuerda con los resultados de [De Plaen et al. \(2016\)](#). Por lo que el resto del análisis se realiza utilizando solamente esta banda de frecuencia.

Los datos de todas las componentes para la estación PCG5 demostraron tener coherencias medias mayores durante la etapa pre-eruptiva y post-eruptiva, señalando que durante la etapa eruptiva, las señales se asemejan menos a la señal de referencia. No obstante los valores se mantienen en un valor promedio mayor a 0.65. Los desfases temporales fueron menos frecuentes durante la fase pre-eruptiva. Sin embargo, se mantuvieron presentes en algunas zonas de la fase post-eruptiva. Las componentes NN demuestran una mayor concordancia en las coherencias medias y desfases temporales según la etapa de actividad, presentando coherencias muy cercanas a 1 durante toda la etapa post-eruptiva y pocos desfases temporales.

Los gráficos de las variaciones en la velocidad sísmica relativa se generaron utilizando los valores de desfase temporal de todas las combinaciones de componentes cruzadas y mismas componentes para obtener un solo valor promedio. Se optó por emplear los valores obtenidos por medio de la media ponderada, ya que muestran un mejor comportamiento de los datos, con menos valores atípicos. Esto puede deberse a que, en su cálculo, se priorizan los valores con menor error, lo que conduce a una estimación más precisa.

Las variaciones de velocidad sísmica relativa muestran diferentes características según los días de apilamiento utilizados. El incremento en los días de apilamiento resulta en la remoción de variaciones de velocidad de corta duración, de modo que los gráficos aparecen más suavizados. Se observa que, al utilizar dos días de apilamiento, las variaciones son de corta duración observándose más picos y cambios, indicando que estas fueron más susceptibles a las señales de fuentes locales. Las variaciones de velocidad sísmica relativa son más marcadas y con mayor duración en los apilamientos de 5 y 10 días, lo cual es consistente con cambios provocados por fuentes regionales, las cuales están relacionadas con el medio. Además, coincide con el tipo de actividad del volcán de Pacaya, en el que los procesos eruptivos suelen durar varios días.

Durante la última semana de abril de 2020 se observa un pico de aumento con una variación en la velocidad sísmica relativa de aproximadamente 0.6 %. Esto concuerda con el inicio de la actividad efusiva durante el periodo pre-eruptivo. Durante el resto del periodo pre-eruptivo, las variaciones se mantienen en su mayoría en valores cercanos a 0.25 %, con algunos ascensos durante abril-mayo y septiembre de 2020, donde las variaciones se mantuvieron en 0.40 %.

Desafortunadamente, no se cuenta con datos de meses antes del periodo eruptivo principal, puesto que la estación interrumpió su funcionamiento de octubre de 2020 hasta finales de enero de 2021, por lo que no se tiene un comportamiento claro de los cambios en la velocidad sísmica relativa meses antes de este periodo.

Para todos los apilamientos, se observa un aumento en las velocidades sísmicas relativas durante el periodo eruptivo principal, alcanzando variaciones máximas de 0.70 % y manteniéndose principalmente en valores cercanos a 0.5 %. Sin embargo, aproximadamente en marzo de 2021, se observa un decaimiento siendo más abrupto en los apilamientos de 2 y 10 días. Este tipo de disminuciones son usuales previo a una erupción.

Es claro un descenso en la velocidad relativa en los meses posteriores a la etapa eruptiva. Esto puede interpretarse como un posible decaimiento en los esfuerzos de tensión asociado con la pérdida de presión en el sistema mágnico. En los años posteriores al periodo de actividad, las variaciones en la velocidad sísmica ambiental son negativas y se mantienen principalmente en valores de -0.25 %.

Las variaciones en la velocidad sísmica determinadas en este estudio son mayores en comparación con las reportadas por [Roca \(2018\)](#). Sin embargo, en ambos se observan aumentos en las variaciones de las velocidades sísmicas relativas en periodos de actividad relacionados con erupciones, desgaseificación y contrucción del cráter. Es importante señalar que el estudio de [Roca \(2018\)](#) no analiza un periodo eruptivo, sino eventos volcánicos discretos durante una fase de relativa estabilidad del volcán.

- Desde el punto de vista metodológico, se evidenció que:
 1. La banda de frecuencia de 1.5 Hz a 4.0 Hz ofrece las correlaciones más claras entre la actividad del volcán de Pacaya y sus patrones de variación sísmica, mostrando una mayor simetría y dispersión en las señales. Esto facilita una interpretación más precisa de los cambios en el sistema volcánico.
 2. Los apilamientos de 5 y 10 días permiten observar de mejor manera las variaciones en la velocidad sísmica relativa para el volcán de Pacaya, las cuales son indicativas de modificaciones en las propiedades del medio. La eliminación de las variaciones de período corto resalta los cambios de mayor duración, los cuales son consistentes con la dinámica del volcán de Pacaya, en la que los procesos volcánicos suelen durar varios días e incluso semanas.
- Se identificaron distintos patrones de variación de velocidad que pueden correlacionarse con distintas fases de actividad volcánica reportados por INSIVUMEH en los boletines especiales para el periodo de estudio. En particular:
 1. el período eruptivo principal se caracterizó por un aumento en las variaciones en la velocidad sísmica relativa, con valores positivos cercanos a 0.50 %, alcanzando un máximo de 0.75 %;
 2. el periodo post-eruptivo tuvo una etapa inicial caracterizada por un descenso considerable en las variaciones relativas de la velocidad sísmica, alcanzando valores cercanos a -1.0 %. En una etapa posterior (años 2022 a 2024) se caracterizó por cambios en la velocidad sísmica relativa de amplitud mucho menor, manteniéndose en valores negativos cercanos a -0.25 %.
- La interferometría sísmica pasiva, basada en la autocorrelación de las mismas componentes y componentes cruzadas en estaciones independientes, demostró ser un método viable para detectar variaciones en la velocidad sísmica relativa para el volcán de Pacaya, cuyo observatorio cuenta con una red de sensores poco densa.

Este estudio sobre la determinación de las variaciones en las velocidades sísmicas relativas en el volcán de Pacaya es un análisis preliminar, ya que solo se identifican grandes periodos de actividad. Por ello, es pertinente realizar un análisis más detallado de los eventos individuales dentro de estos periodos para una comprensión más precisa de la dinámica volcánica. Para ello, se recomienda incluir más de una estación del mismo tipo en el análisis, lo que permitiría comparar los resultados de cada estación individualmente y calcular un promedio entre ellas, proporcionando así información más completa.

Durante el cálculo de los desfases temporales dt/t se recomienda evaluar el uso de ventanas de distinta longitud y reducir el tiempo de retardo mínimo, ya que esto podría mejorar la detección de variaciones más sutiles en la velocidad sísmica relativa.

Para los apilamientos se recomienda utilizar un paso de un día, para observar cambios más suaves durante el análisis de las variaciones relativas de la velocidad sísmica.

Dado que este estudio no dispone de datos para los meses previos a la etapa eruptiva principal, sería conveniente analizar otras fases eruptivas del volcán de Pacaya, incluso aquellas de menor intensidad, siempre que cuenten con registros de algunas semanas o meses antes del inicio de la actividad. Esto permitiría evaluar patrones previos a una erupción.

Finalmente, se recomienda considerar los posibles efectos de las precipitaciones en las variaciones de la velocidad sísmica relativa.

- Anggono, T., Nishimura, T., Sato, H., Ueda, H., y Ukawa, M. (2012, Aug). Spatio-temporal changes in seismic velocity associated with the 2000 activity of miyakejima volcano as inferred from cross-correlation analyses of ambient noise. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 247-248, 93–107. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377027312002399> doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.08.001>
- Arfken, G. B., Weber, H. J., y Harris, F. E. (2013). *Mathematical methods for physicists a comprehensive guide*. Amsterdam (Holanda) Elsevier.
- Babu, P. R. (2008). *Digital signal processing* (Fourth Edition ed.). Scitech Publications.
- Bardintzeff, J.-M., y Deniel, C. (1992, Apr). Magmatic evolution of pacaya and cerro chiquito volcanological complex, guatemala. *Bulletin of volcanology*, 54(4), 267–283. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00301482>
- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., ... Yang, Y. (2007, Jun). Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1239–1260. Descargado de <https://academic.oup.com/gji/article/169/3/1239/626431> doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2007.03374.x>
- Braun, S. (2001). Windows. *Encyclopedia of Vibration*, 1587–1595. doi: <https://doi.org/10.1006/rwvb.2001.0052>
- Brenguier, F., Shapiro, N. M., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Coutant, O., y Nercessian, A. (2008, Jan). Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise. *Nature Geoscience*, 1(2), 126–130. doi: <https://doi.org/10.1038/ngeo104>
- Bretherton, C. (2015). *Atm s 552 lecture 14: Cross-spectral analysis 1 the cross-spectrum*. Descargado de <https://www.atmos.washington.edu/~breth/classes/AS552/lect/lect14.pdf>
- Clarke, D., Zaccarelli, L., Shapiro, N. M., y Brenguier, F. (2011, Jun). Assessment of resolution

-
- and accuracy of the moving window cross spectral technique for monitoring crustal temporal variations using ambient seismic noise. *Geophysical Journal International*, 186(2), 867–882. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2011.05074.x>
- De Plaen, R. S. M., Lecocq, T., Caudron, C., Ferrazzini, V., y Francis, O. (2016, Aug). Single-station monitoring of volcanoes using seismic ambient noise. *Geophysical Research Letters*, 43(16), 8511–8518. doi: <https://doi.org/10.1002/2016gl070078>
- DeVlieg, J. (2023, Jan). Comprehensive analysis of seismic signals from pacaya volcano using deep learning event detection. doi: <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etr/1643>
- Duputel, Z., Ferrazzini, V., Brenguier, F., Shapiro, N. M., Campillo, M., y Nercessian, A. (2009, Jul). Real time monitoring of relative velocity changes using ambient seismic noise at the piton de la fournaise volcano (la réunion) from january 2006 to june 2007. , 184(1-2), 164–173. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.11.024>
- Eggers, A. A. (1971). *The geology and petrology of the amatitlán quadrangle, guatemala* (Tesis Doctoral, Darmouth College, Hanover, New Hampshire). Descargado de https://collections.dartmouth.edu/archive/object/dcdis/dcdis-eggers1971?ctx=dcdis#?start=0&length=12&view=list&rdat_only_u=no&rdat_u=yes&col=dcdis&oc_0=main-title&od_0=a&sv=eggers
- Gonzalez-Santana, J., Wauthier, C., y Waite, G. (2024, Feb). The 2021 eruption of pacaya volcano, guatemala – geophysical analysis through satellite geodesy and seismic noise correlations. *Journal of volcanology and geothermal research*, 108027–108027. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108027>
- Guettinger, M. (2016, Jan). Preliminary seismic coda wave attenuation study of pacaya volcano, guatemala. doi: <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etr/266>
- Heath, B., Hooft, E. E., y Toomey, D. R. (2018, Mar). Autocorrelation of the seismic wavefield at newberry volcano: Reflections from the magmatic and geothermal systems. *Geophysical Research Letters*, 45(5), 2311–2318. doi: <https://doi.org/10.1002/2017gl076706>
- Imiya, A., Sasaki, T., y Ogawa, H. (2005, Mar). Generalized lanczos method for signal smoothing. Descargado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/1169088> doi: <https://doi.org/10.1109/icassp.1986.1169088>
- INSIVUMEH. (2010). *Reporte de erupción volcán pacaya* (Inf. Téc.). Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala. Descargado de <https://insivumeh.gob.gt/folleto/REPORTE%20PRELIMINAR%20ERUPCION%20PACAYA%2027%20MAYO%202010.pdf>
- INSIVUMEH. (2024). *Volcán de pacaya* (Inf. Téc.). Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala. Descargado de https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2024/08/Folleto_Pacaya_2024_FINAL.pdf
- IRIS. (2012). *Seed reference manual standard for the exchange of earthquake data seed format version 2.4*. Descargado de https://www.fdsn.org/pdf/SEEDManual_V2.4.pdf
- Konstantinou, K. I., y Schlindwein, V. (2003). Nature, wavefield properties and source mechanism of volcanic tremor: a review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*,

-
- 119(1), 161-187. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027302003116> doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00311-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00311-6)
- Lanza, F., Kenyon, L. M., y Waite, G. P. (2016). Near-surface velocity structure of pacaya volcano, guatemala, derived from small-aperture array analysis of seismic tremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1438–1445. doi: <https://doi.org/10.1785/0120150275>
- Lanza, F., y Waite, G. P. (2018, Sep). Nonlinear moment-tensor inversion of repetitive long-periods events recorded at pacaya volcano, guatemala. *Frontiers in Earth Science*, 6. doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00139>
- Lecocq, T. (2019). *Msnoise documentation release 1.6*. Descargado de <http://msnoise.org/doc/MSNoise.pdf>
- Lecocq, T., Caudron, C., y Brenguier, F. (2014a, 05). Msnoise, a Python Package for Monitoring Seismic Velocity Changes Using Ambient Seismic Noise. *Seismological Research Letters*, 85(3), 715-726. Descargado de <https://doi.org/10.1785/0220130073> doi: 10.1785/0220130073
- Lecocq, T., Caudron, C., y Brenguier, F. (2014b, May). Msnoise, a python package for monitoring seismic velocity changes using ambient seismic noise. *Seismological Research Letters*, 85(3), 715–726. doi: <https://doi.org/10.1785/0220130073>
- Lilley, F., y Gdeisat, M. (2011). *One-dimensional phase unwrapping problem*. Descargado de https://www.ljmu.ac.uk/~media/files/ljmu/about-us/faculties-and-schools/fet/geri/onedimensionalphaseunwrapping_finalpdf.pdf
- Liu, Y., Xia, J., Zhang, H., Guan, B., y Xi, C. (2023, Dec). Calculation of noise cross-correlation functions between different types of sensors without removing instrument responses. *Journal of Physics: Conference Series*, 2651(1). doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2651/1/012025>
- Nakata, N., Gualtieri, L., y Fichtner, A. (2019). *Seismic ambient noise*. Cambridge ; New York, Ny: Cambridge University Press.
- Pilz, M., y Parolai, S. (2012, Jan). Tapering of windowed time series. , 1–4. doi: https://doi.org/10.2312/gfz.nmsop-2_is_14.1
- Poupinet, G., Ellsworth, W. L., y Fréchet, J. (1984, Jul). Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the calaveras fault, california. *Journal of Geophysical Research*, 89(B7), 5719–5731. doi: <https://doi.org/10.1029/jb089ib07p05719>
- Puel, S. (2017, Jan). Comparison of ambient noise methods to find surface - wave dispersion curves at pacaya volcano, guatemala. doi: <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etr/377>
- Roca, A. (2018). Medición de pequeñas perturbaciones de velocidad sísmica para el volcán de Pacaya, Guatemala, utilizando ruido sísmico ambiental [Tesis de Licenciatura, Universidad San Carlos de Guatemala]. *Respositorio Institucional USAC*. Descargado de https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2018-11/Tesis%20Amilcar%20Roca_0.pdf
- Roca, A., Roberto, E., Maria, C., María, D., Marroquín, G., Javier, F., y Ordoñez, P. A. (2021, Nov). Volcano observatories and monitoring activities in guatemala. *Volcanica*, 4(S1), 203–222. doi: <https://doi.org/10.30909/vol.04.s1.203222>
- Rose, W. I., Palma, J., Escobar-Wolf, R., y Gomez, R. (2011). A 50 yr eruption of a basaltic

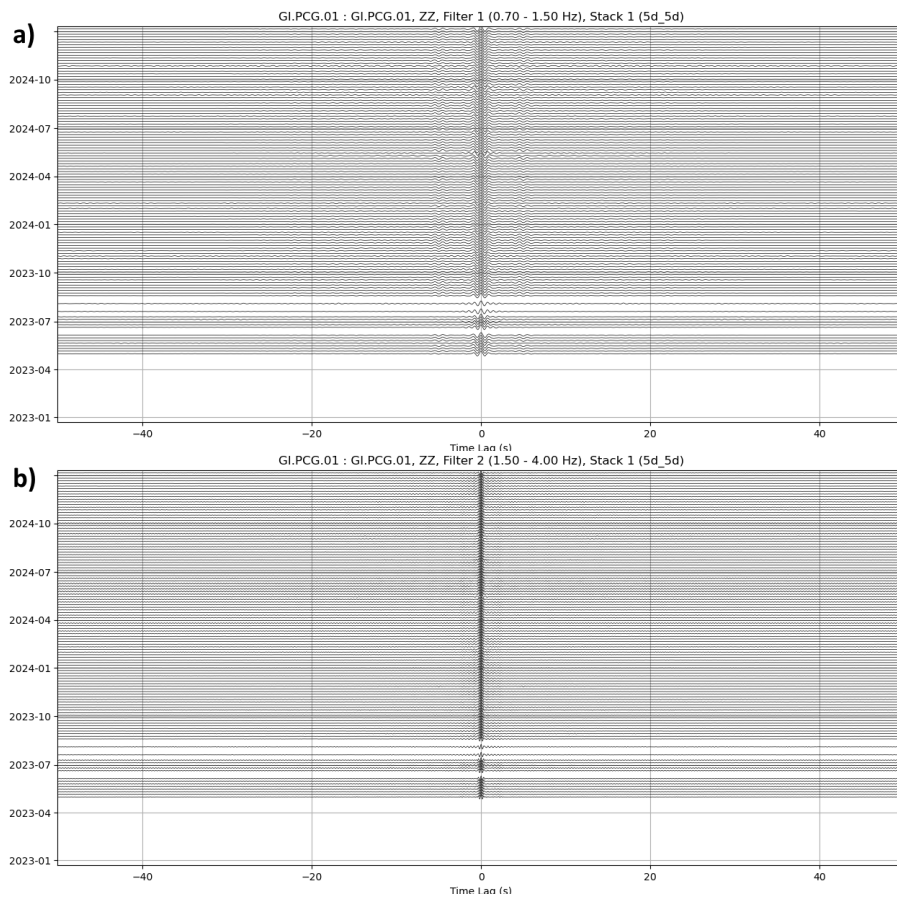
-
- composite cone: Pacaya, guatemala. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 498. doi: 10.1130/2013.2498(01)
- Rutherford, M. (2008, 01). Magma ascent rates. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry - REV MINERAL GEOCHEM*, 69, 241-271. doi: 10.2138/rmg.2008.69.7
- Sang, W., Lee, J., y Han, S. (2013, Mar). Seismic ambient noise and its applicability to monitor cryospheric environment. *InTech eBooks*. doi: <https://doi.org/10.5772/55670>
- Smith, S. W. (1999). *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. San Diego, Calif.: California Technical Pub.
- Smithsonian Institute Global Volcanism Program. (1995). Report on pacaya (guatemala). *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 20(5). doi: <https://doi.org/10.5479/si.gvp.bgvn199505-342110>
- Taddeucci, J., Edmonds, M., Houghton, B., James, M. R., y Vergnolle, S. (2015). Chapter 27 - hawaiian and strombolian eruptions. En H. Sigurdsson (Ed.), *The encyclopedia of volcanoes (second edition)* (Second Edition ed., p. 485-503). Amsterdam: Academic Press. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123859389000274> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00027-4>
- Tilling, R. (1996). *Volcanoes*. U.S. Department of the Interior, Geological Survey. Descargado de <https://books.google.com.gt/books?id=i81QAAAAYAAJ>
- Tukey, J. W. (1992). The future of data analysis. *Springer Series in Statistics*, 408-452. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_31
- Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., y Verdel, A. (2010, Sep). Tutorial on seismic interferometry: Part 1 — basic principles and applications. *GEOPHYSICS*, 75(5), 75A195-75A209. doi: <https://doi.org/10.1190/1.3457445>
- Wardman, J., Sword-Daniels, V., Stewart, C., y Wilson, T. (2012). *Impact assessment of the may 2010 eruption of pacaya volcano, guatemala*. GNS Science Report 2012/09. Descargado de <https://ir.canterbury.ac.nz/server/api/core/bitstreams/c238d81b-d71d-4d95-9736-fac4a1900ac5/content>
- Wassermann, J. (2012, Jan). Volcano seismology. En P. Bormann (Ed.), *New manual of seismological observatory practice 2 (nmsop-2)* (p. 1-77). Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. Descargado de https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch13 doi: https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch13
- Yang, X., Bryan, J., Okubo, K., Jiang, C., Clements, T., y Denolle, M. A. (2022, 10). Optimal stacking of noise cross-correlation functions. *Geophysical Journal International*, 232(3), 1600-1618. Descargado de <https://doi.org/10.1093/gji/ggac410> doi: 10.1093/gji/ggac410
- Zobin, V. (2003). Chapter 12 earthquakes related to pyroclastic flows and rockfalls. En *Introduction to volcanic seismology* (Vol. 6, p. 213-224). Elsevier. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871644X03802127> doi: [https://doi.org/10.1016/S1871-644X\(03\)80212-7](https://doi.org/10.1016/S1871-644X(03)80212-7)
- Zobin, V. (2014, Jan). Volcano seismology: An introduction. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, 1-34. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_607-1
- Zobin, V. (2017a). Chapter 12 - volcanic tremor. En V. M. Zobin (Ed.), *Introduction to volcanic*

-
- seismology (third edition)* (Third Edition ed., p. 263-288). Oxford: Elsevier. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636317000121> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63631-7.00012-1>
- Zobin, V. (2017b). Chapter 13 - seismic signals associated with pyroclastic flows, rockfalls, and lahars. En V. M. Zobin (Ed.), *Introduction to volcanic seismology (third edition)* (Third Edition ed., p. 289-322). Oxford: Elsevier. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636317000133> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63631-7.00013-3>
- Zobin, V. (2017c). Chapter 14 - seismic signals associated with volcanic explosions. En V. M. Zobin (Ed.), *Introduction to volcanic seismology (third edition)* (Third Edition ed., p. 323-359). Oxford: Elsevier. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636317000145> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63631-7.00014-5>
- Zobin, V. (2017d). Chapter 15 - long-period and very-long-period seismic signals at volcanoes. En V. M. Zobin (Ed.), *Introduction to volcanic seismology (third edition)* (Third Edition ed., p. 361-388). Oxford: Elsevier. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636317000157> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63631-7.00015-7>
- Zobin, V. (2017e). Chapter 4 - origin of volcano-tectonic earthquakes. En Zobin (Ed.), *Introduction to volcanic seismology (third edition)* (Third Edition ed., p. 61-80). Oxford: Elsevier. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636317000042> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63631-7.00004-2>
- Zobin, V. (2018, May). An overview of the dynamics of the volcanic paroxysmal explosive activity, and related seismicity, at andesitic and dacitic volcanoes (1960–2010). *Frontiers in Earth Science*, 6. doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00046>

12.1. Gráficos de funciones de correlación

12.1.1. PCG

ZZ



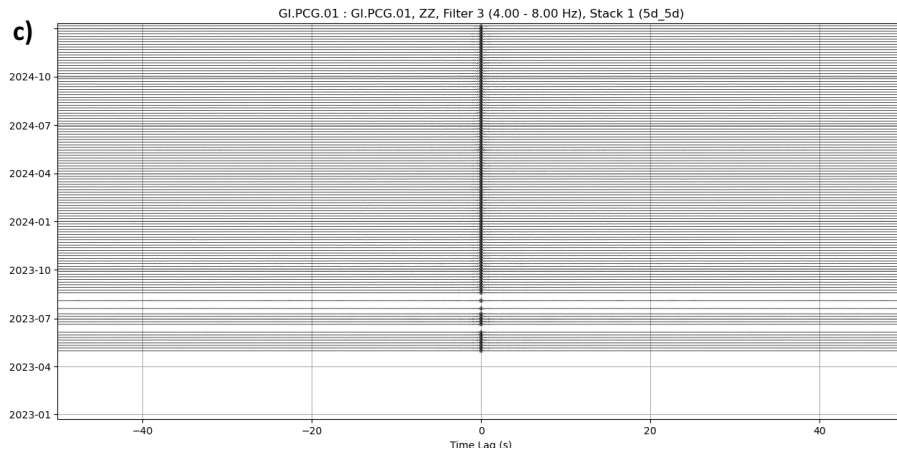


Figura 12.1: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas ZZ (2021-2024) para la estación PCG utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

12.1.2. PCG2

EN

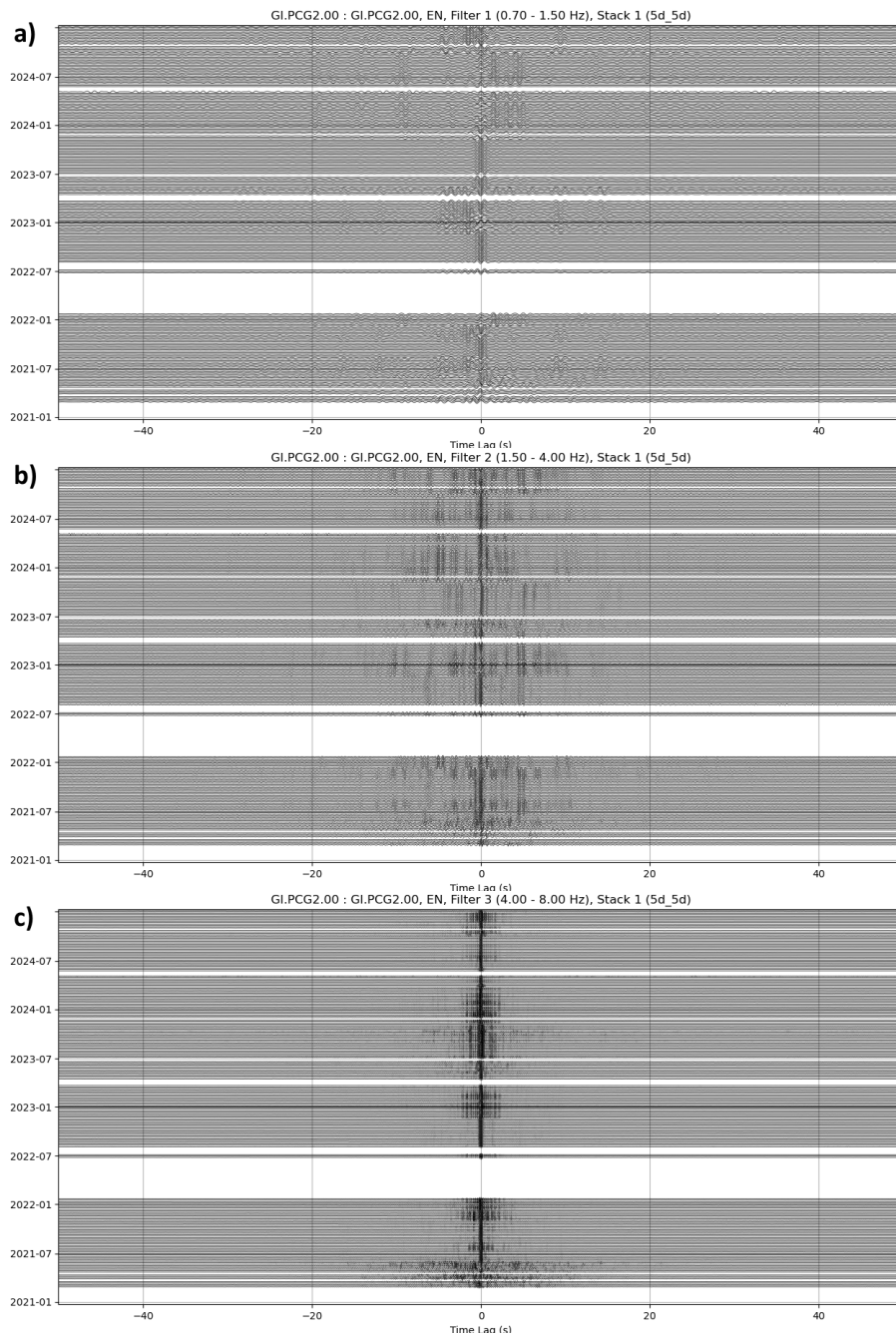


Figura 12.2: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EN (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

EZ

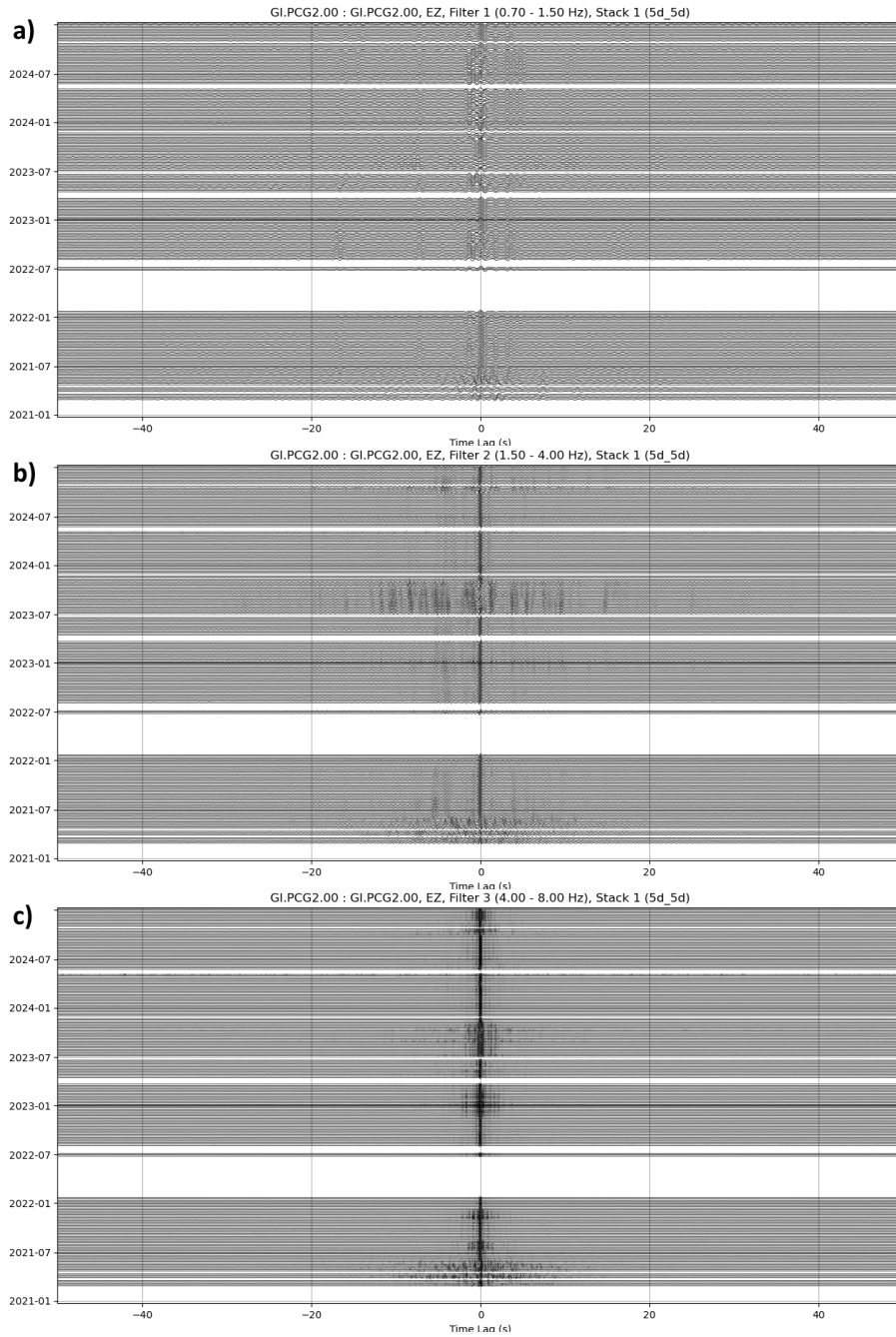


Figura 12.3: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EZ (2021-2024) para la estación PCG2 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

NN

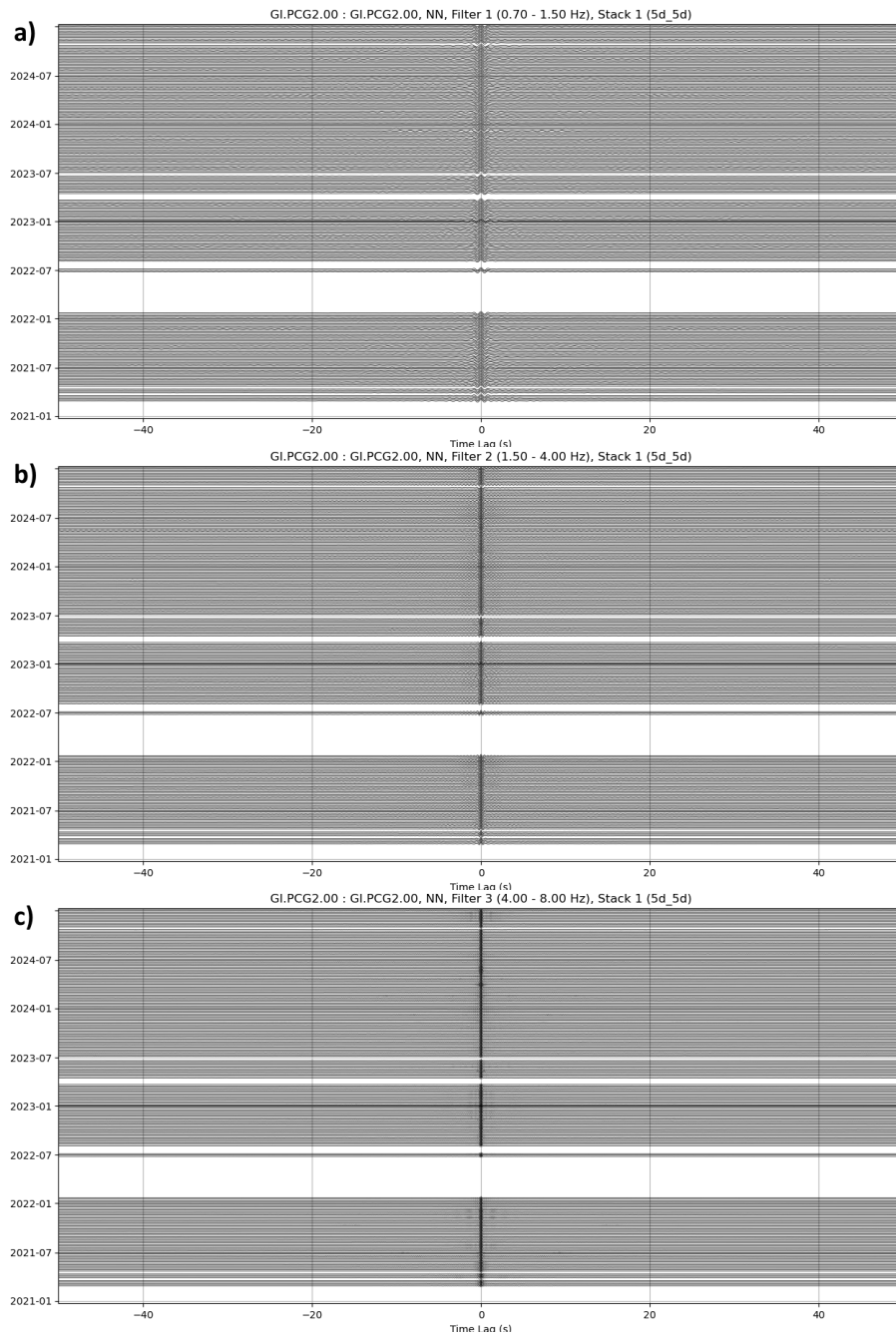


Figura 12.4: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NN (2021-2024) para la estación PCG utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

12.1.3. PCG4

EN

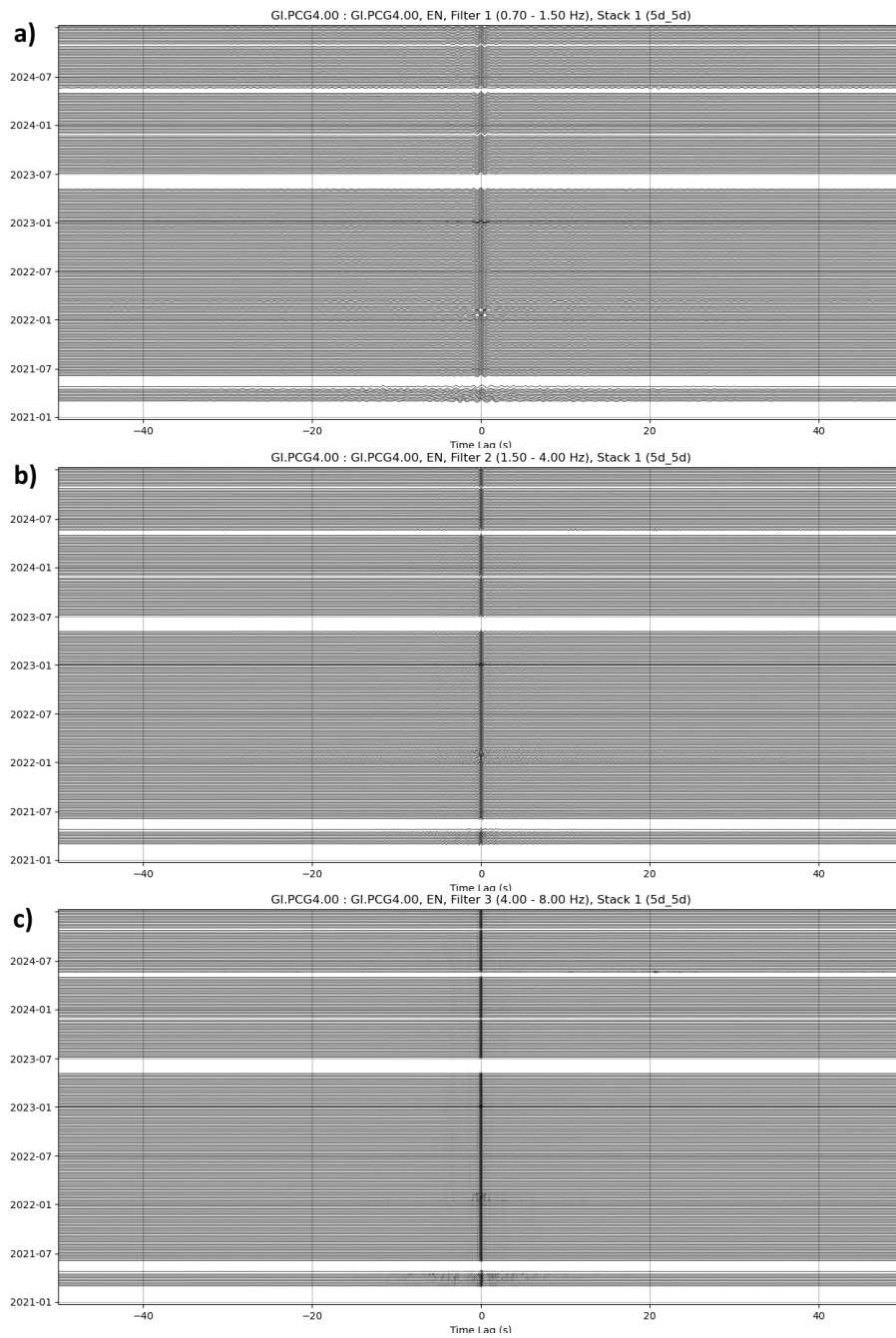


Figura 12.6: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EN (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

EZ

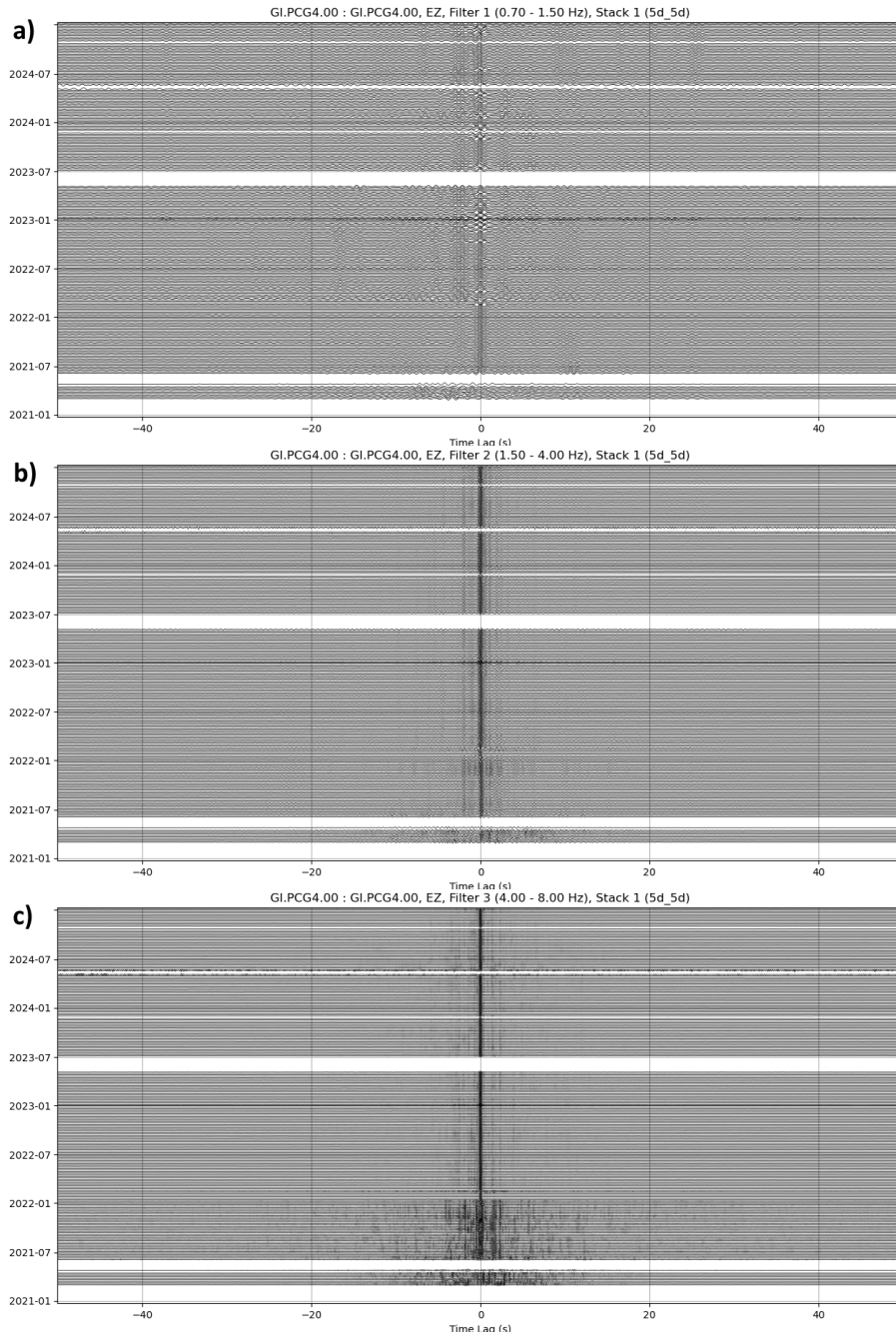


Figura 12.7: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EZ (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

NN

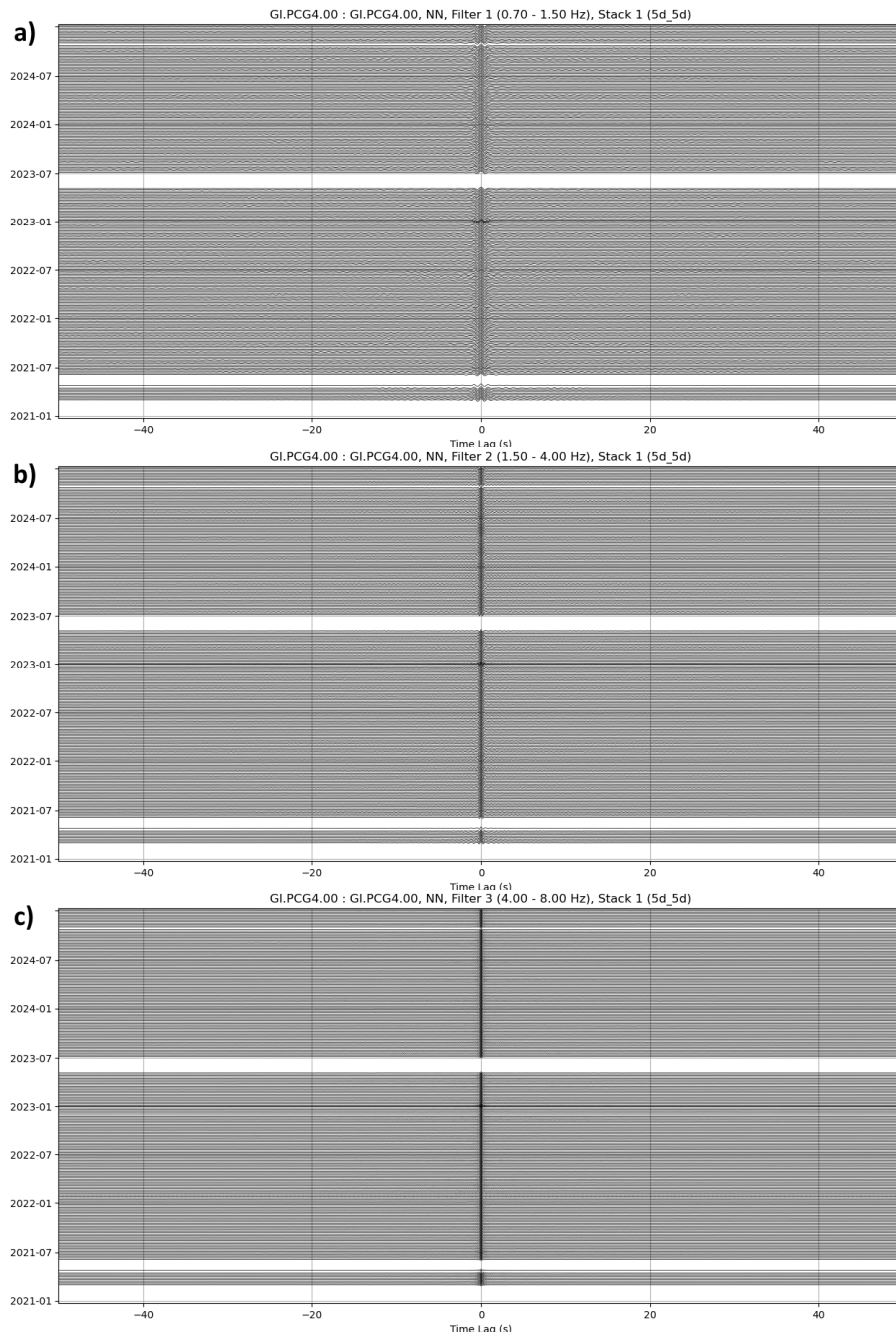


Figura 12.8: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NN (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

ZZ

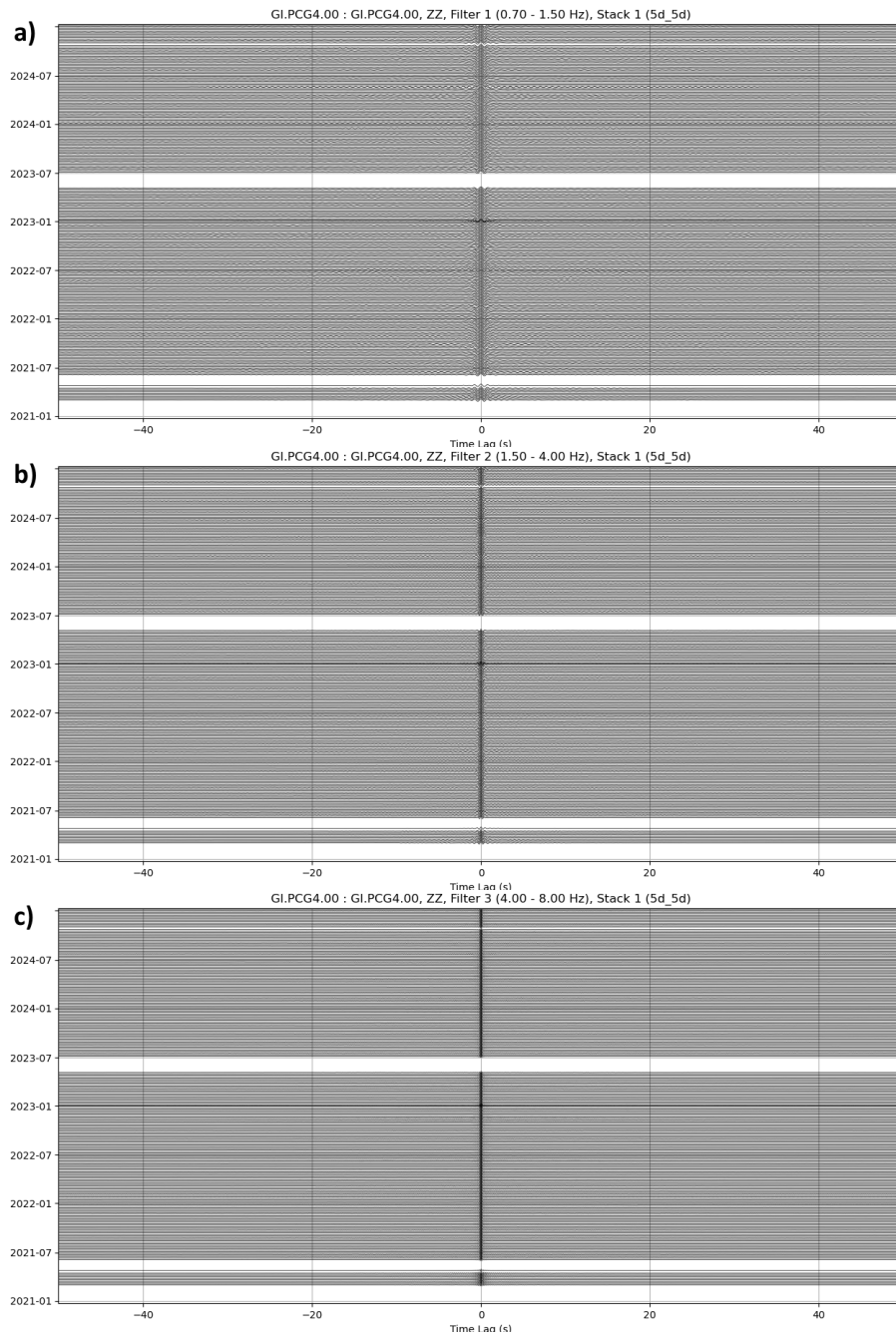


Figura 12.9: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas ZZ (2021-2024) para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

12.1.4. PCG5

EN

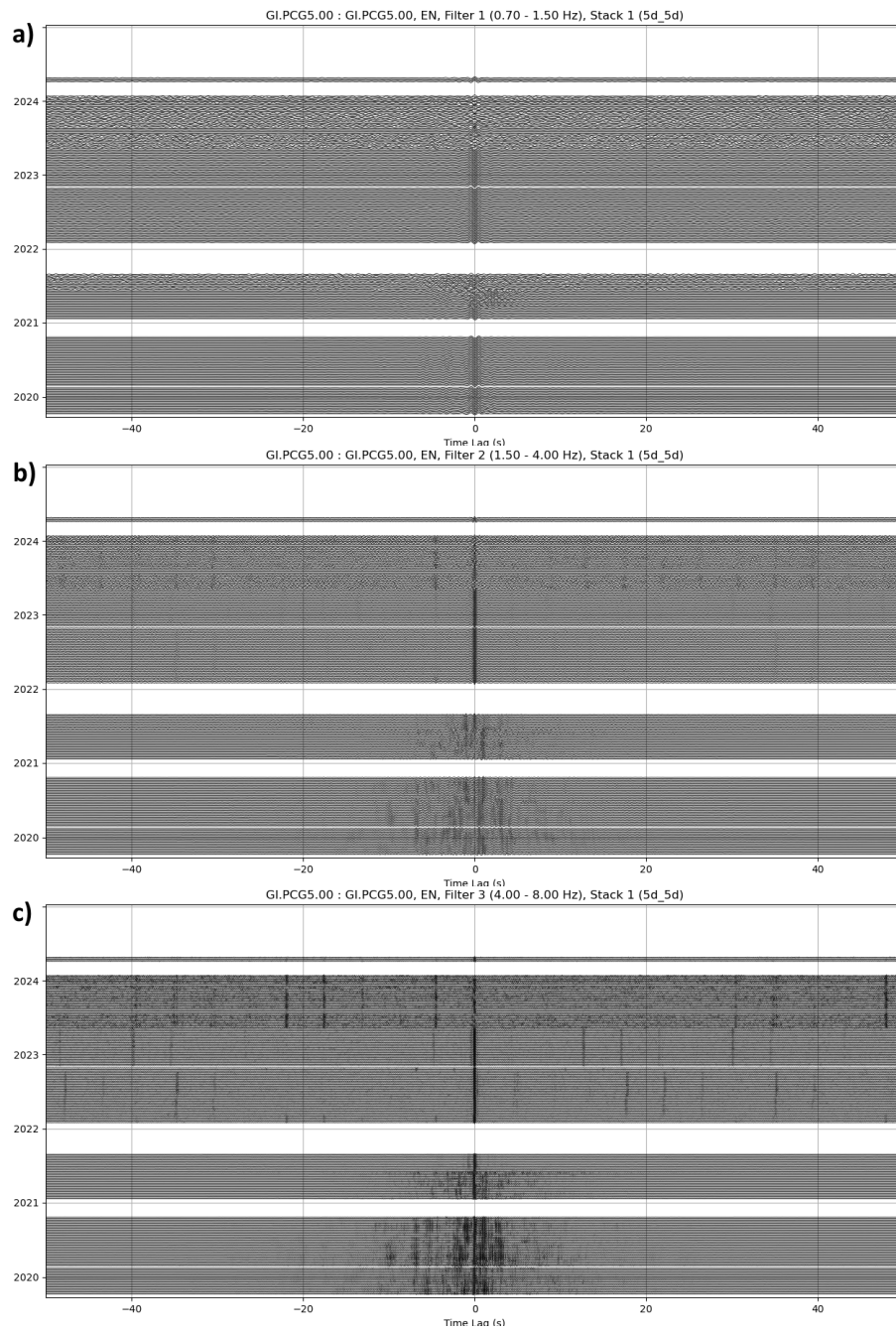


Figura 12.10: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EN (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

EZ

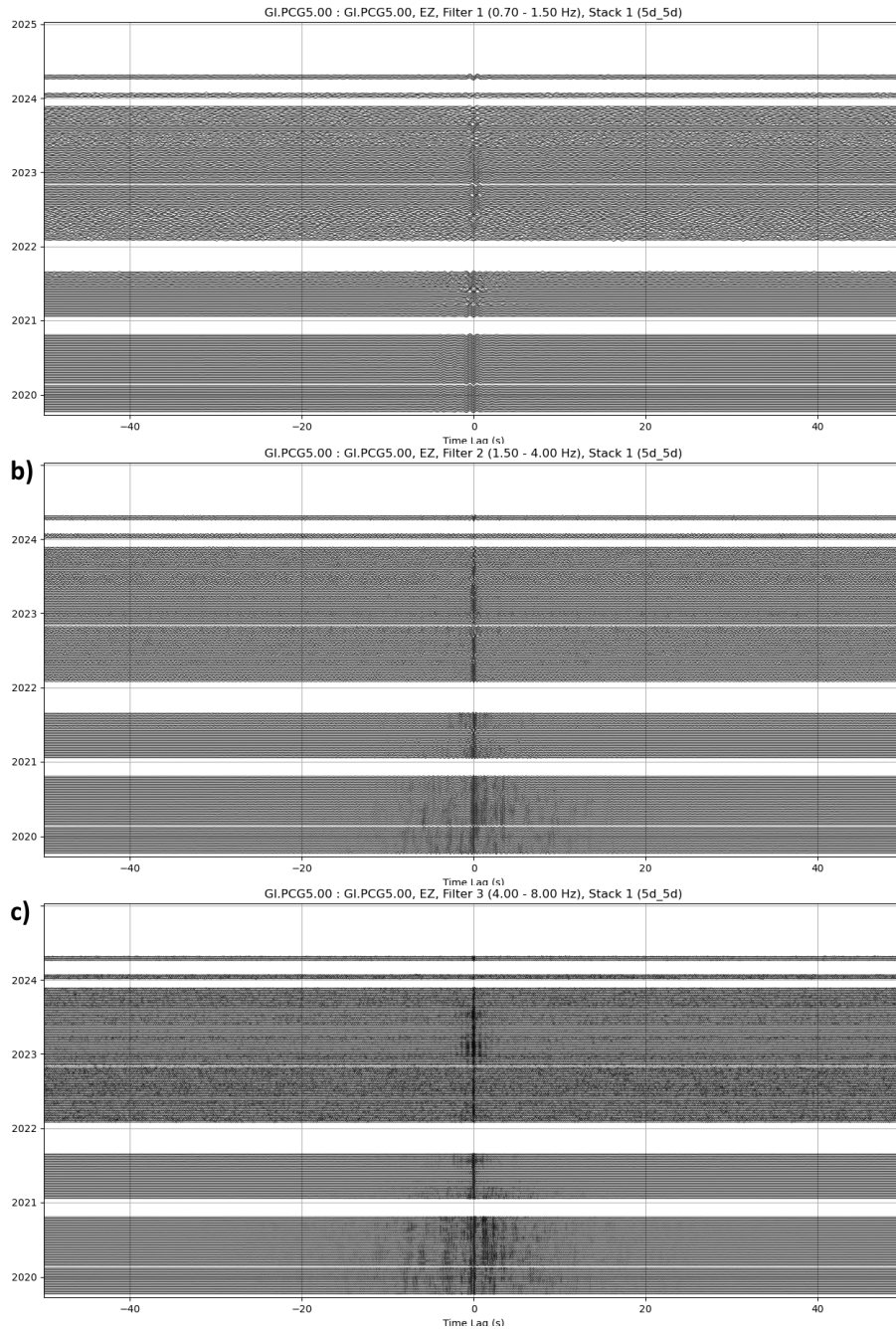


Figura 12.11: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EZ (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

NN

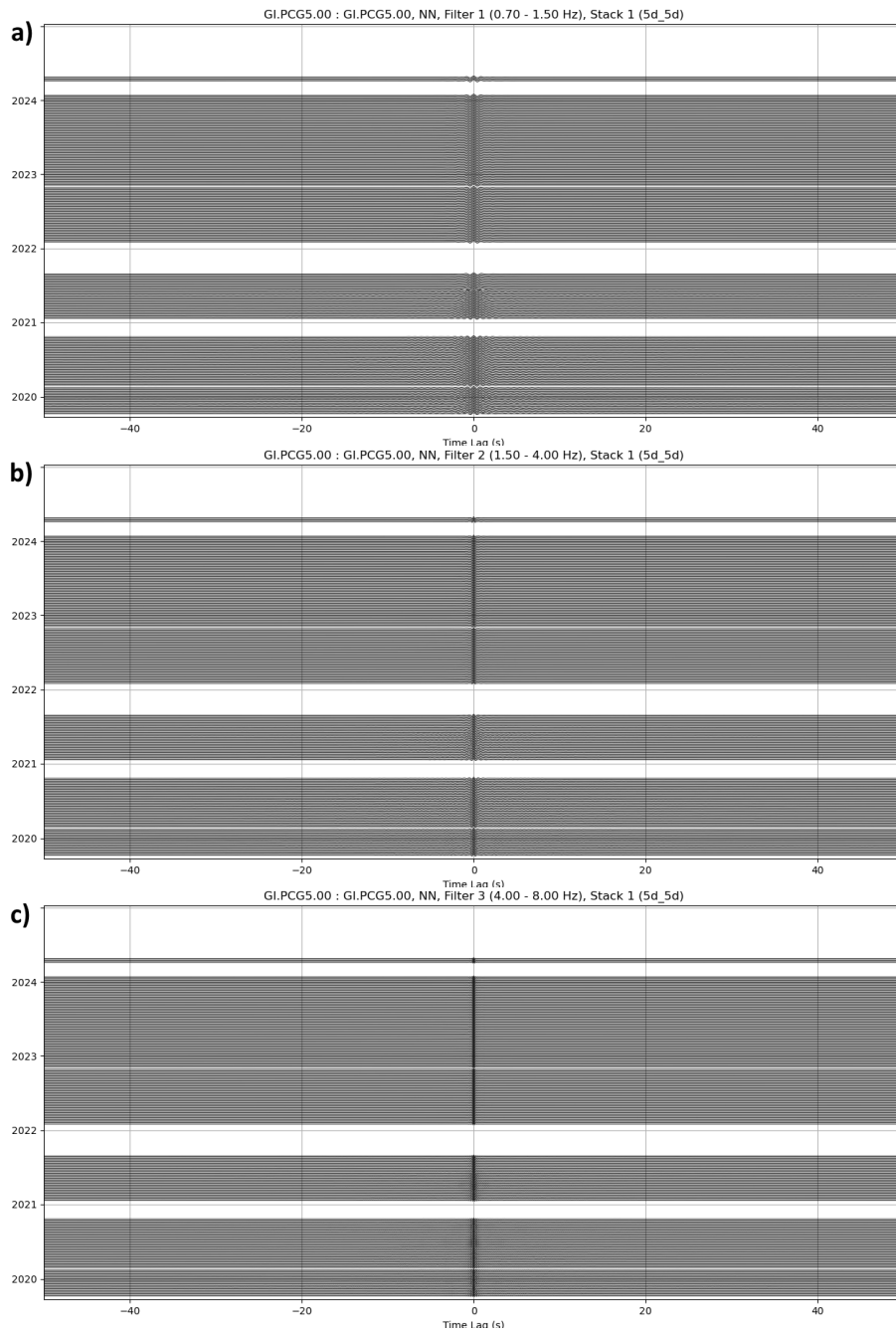


Figura 12.12: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NN (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

ZZ

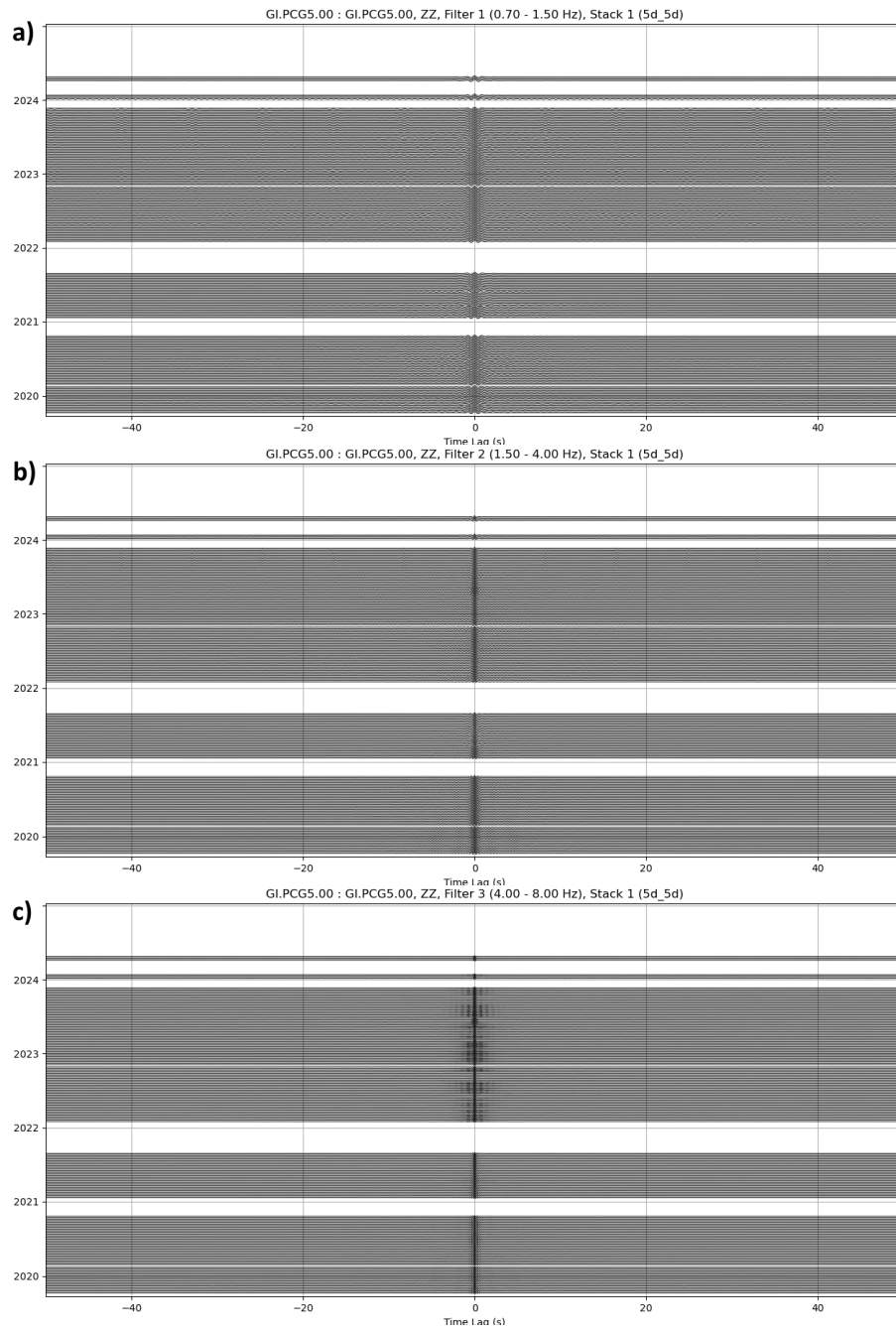


Figura 12.13: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas ZZ (2019-2024) para la estación PCG5 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

12.1.5. PCG6

EE

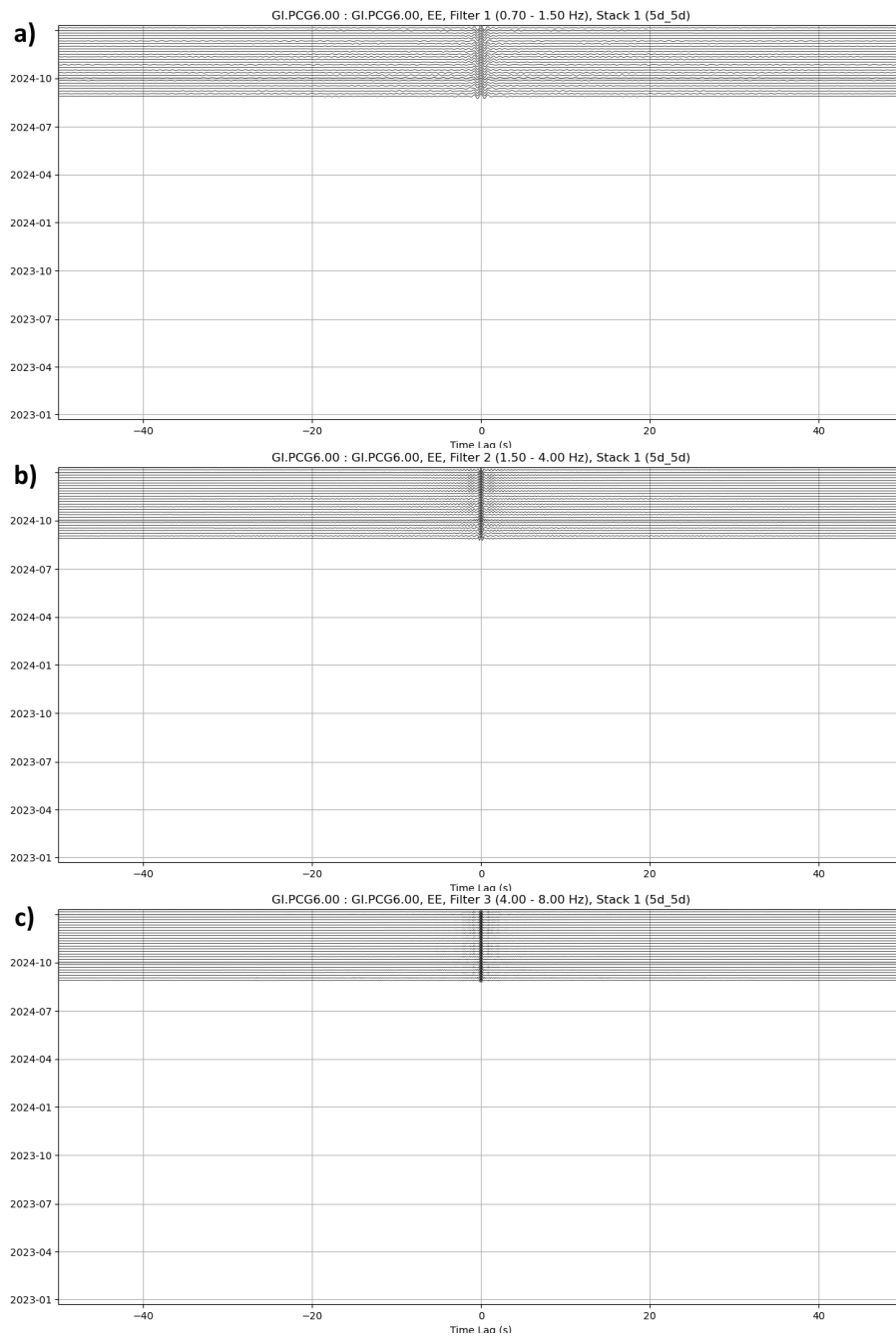


Figura 12.14: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EE (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

EN

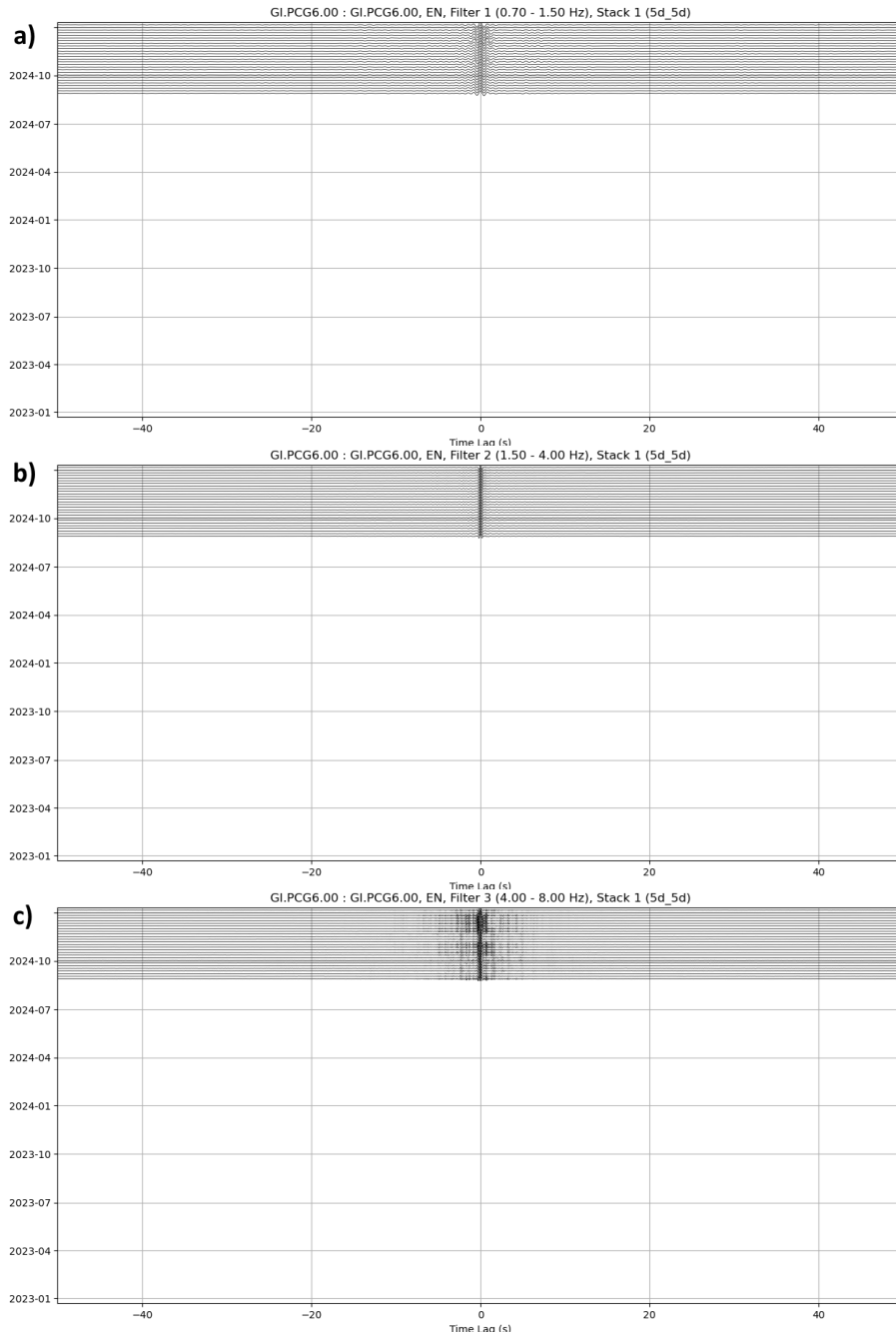


Figura 12.15: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EN (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

EZ

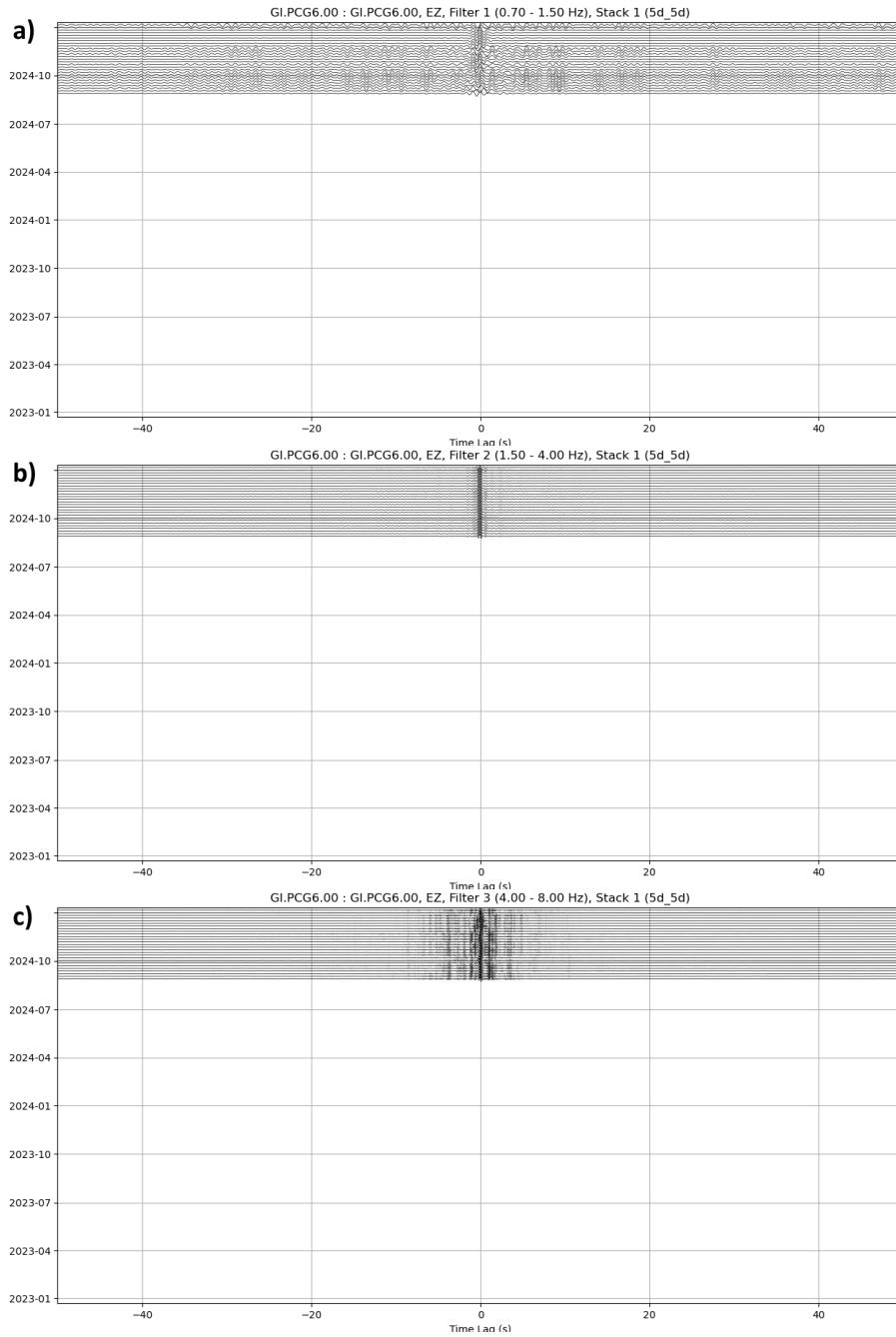


Figura 12.16: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas EZ (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

NN

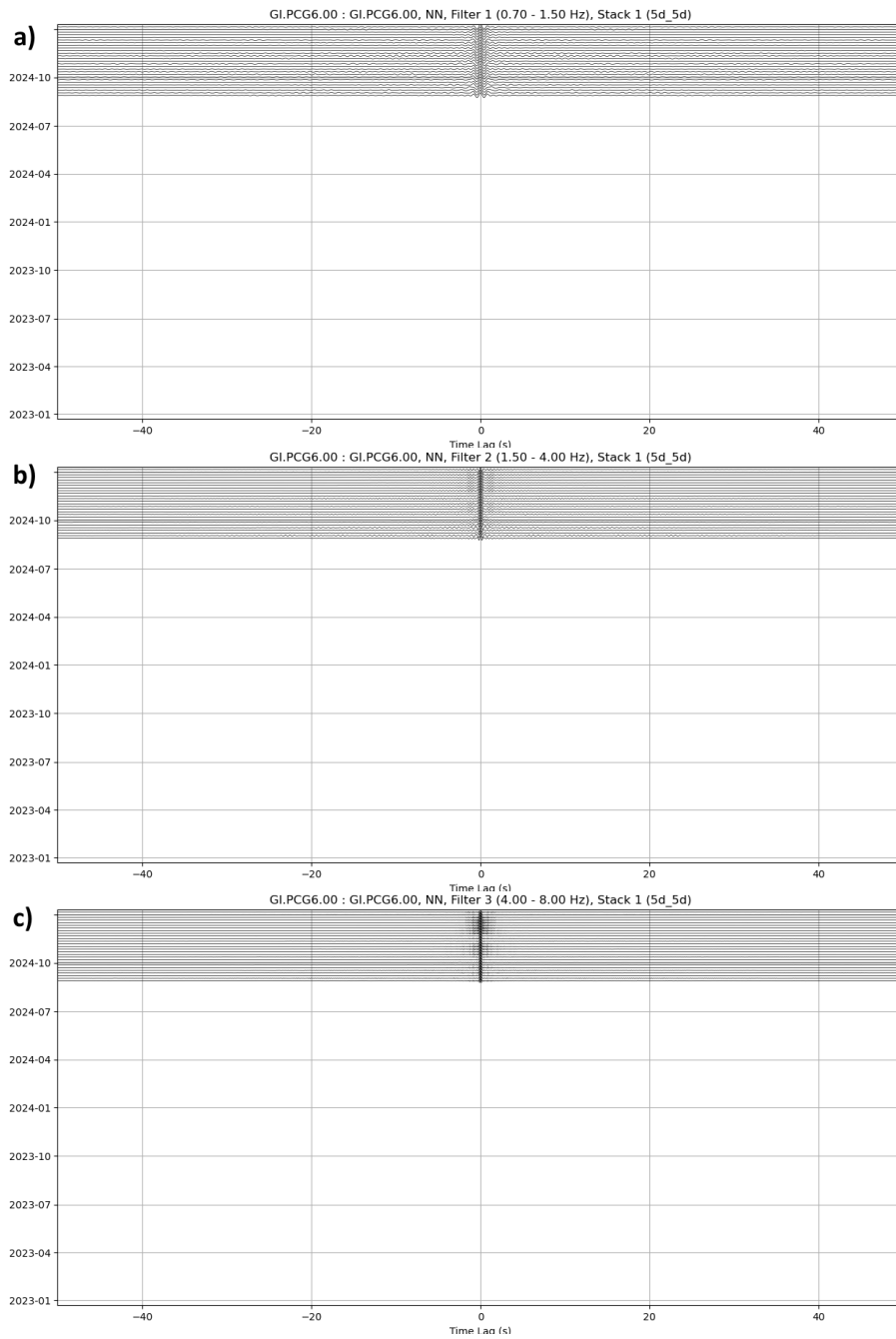


Figura 12.17: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NN (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

NZ

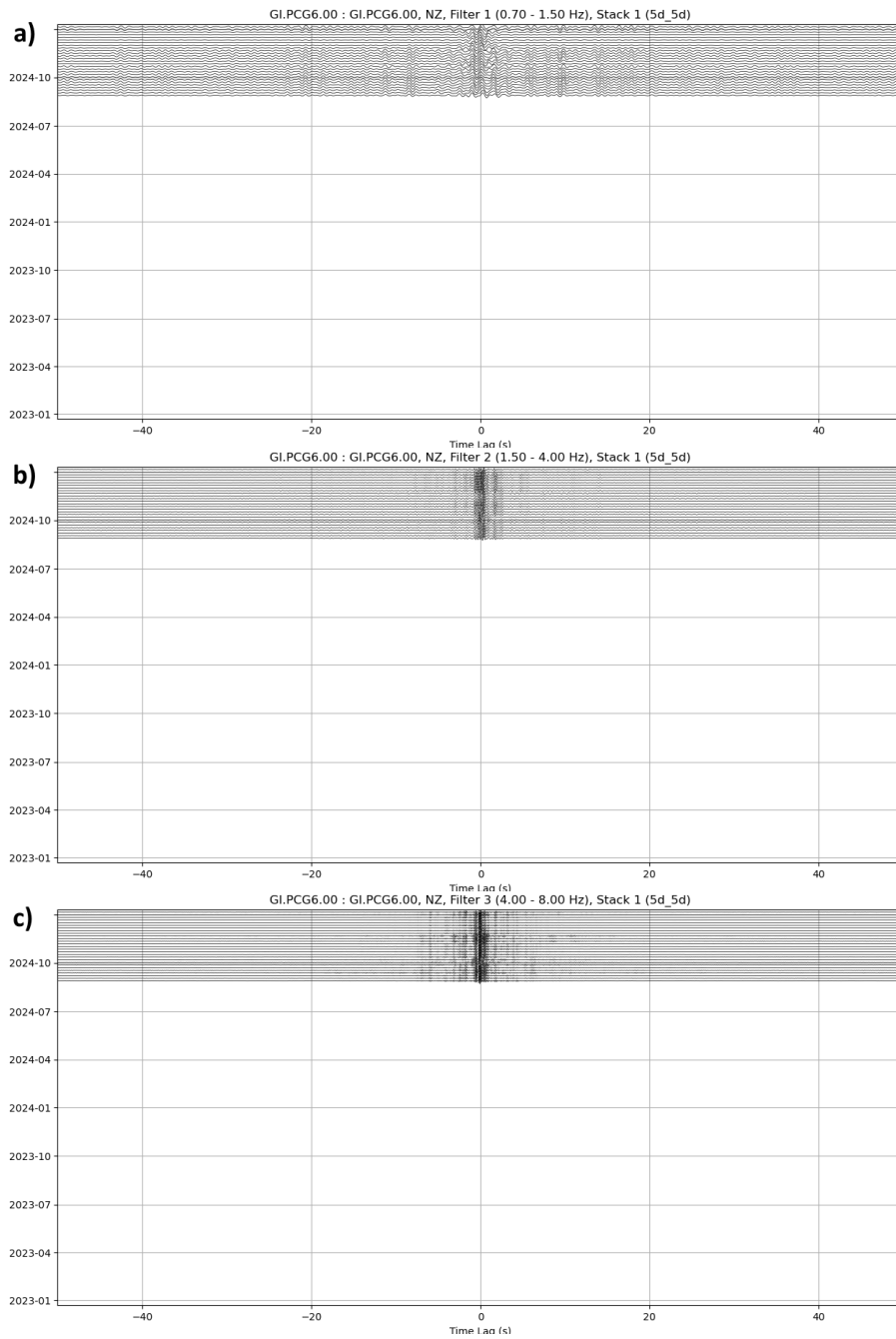


Figura 12.18: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas NZ (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

ZZ

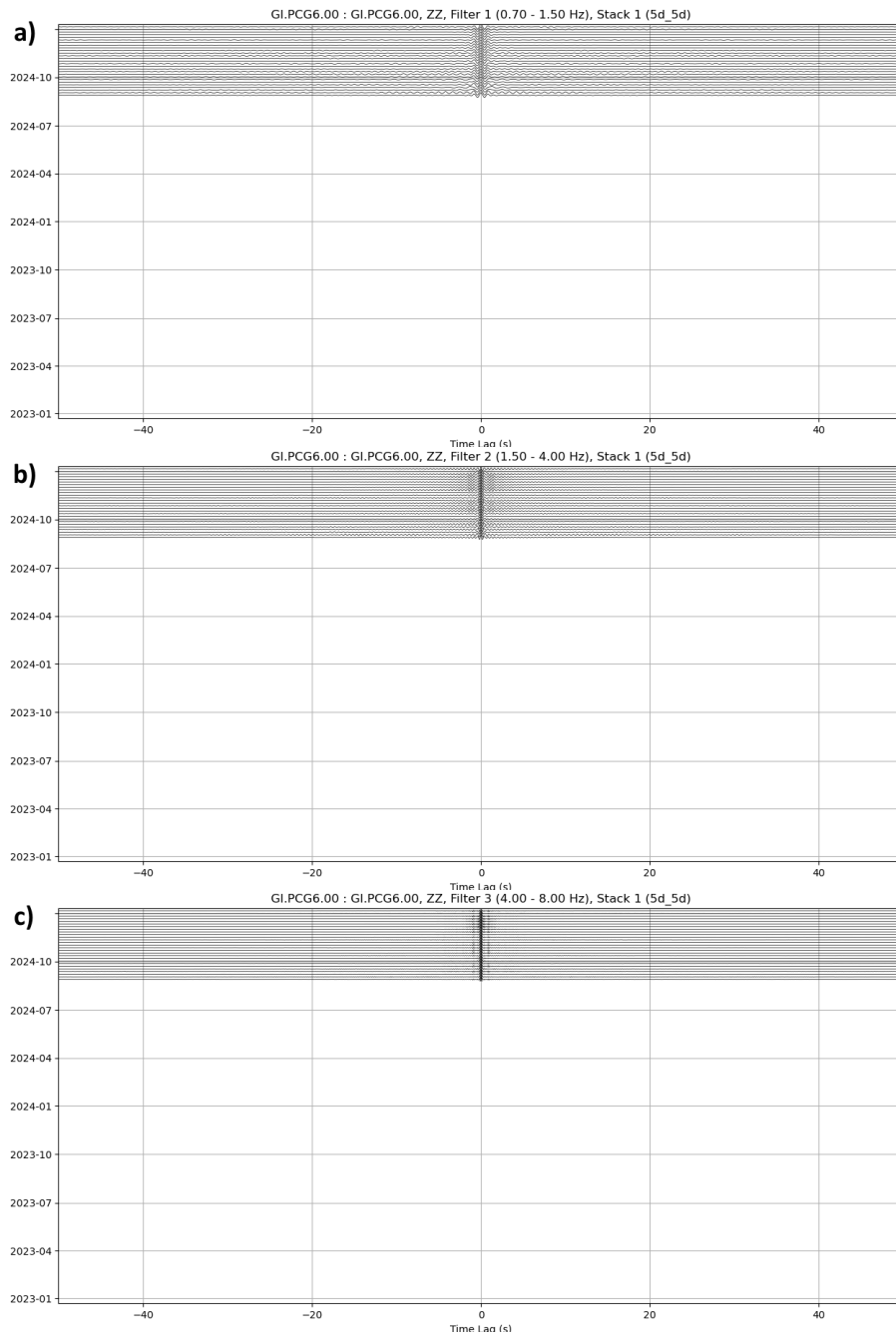


Figura 12.19: Gráfico de funciones de correlación de las componentes cruzadas ZZ (2024) para la estación PCG6 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

12.2. Gráficos de espectro cruzado

12.2.1. Estación PCG4 componentes NZ

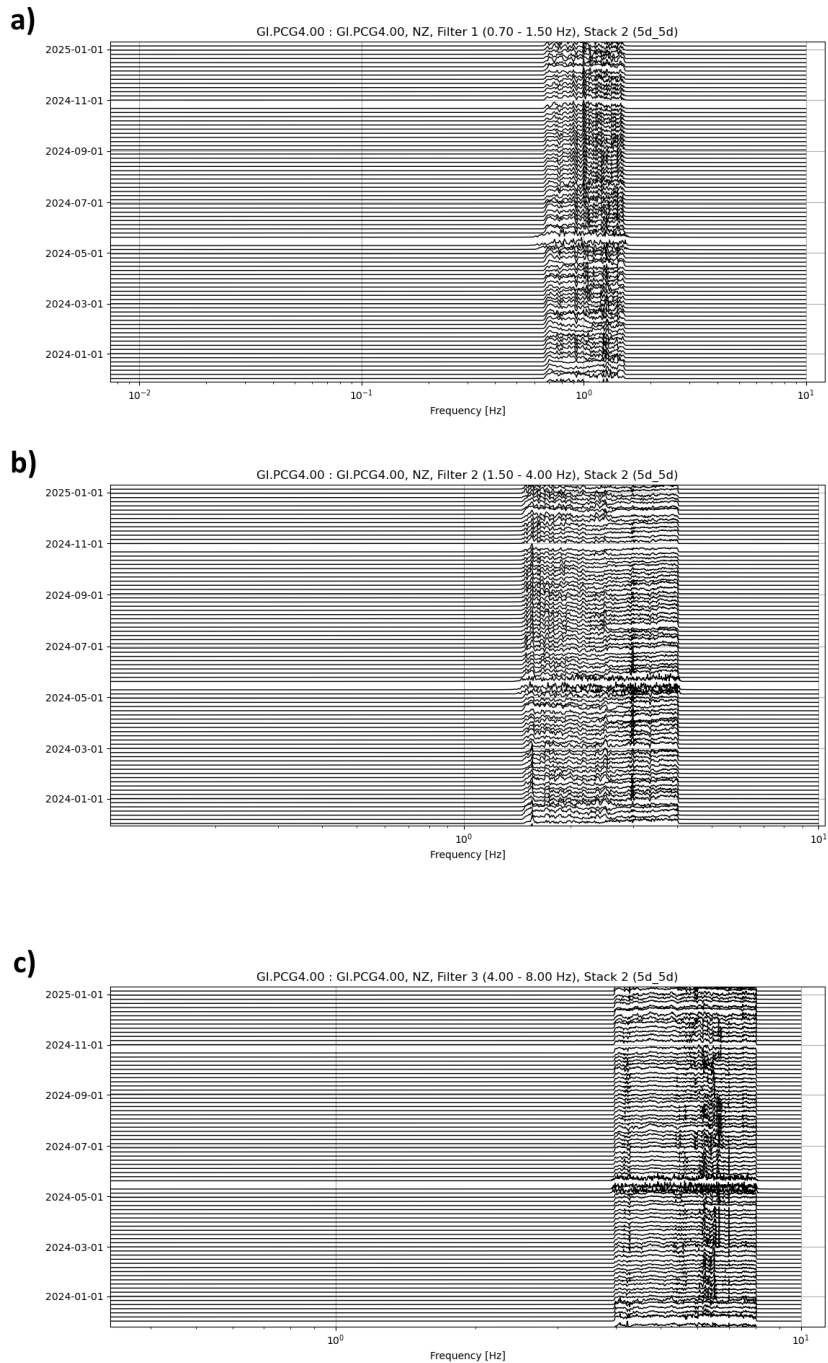


Figura 12.20: Gráfico espectro de las funciones de correlación cruzada de las componentes cruzadas NZ para la estación PCG4 utilizando los filtros a) 0.70 - 1.50 Hz, b) 1.50 - 4.0 Hz, y c) 4.0 - 8.0 Hz

Pueden obtenerse gráficos del espectro de todas las funciones de correlación realizadas. Para este

trabajo se incluyen solamente para las componentes cruzadas NZ de la estación PCG4, puesto que se utiliza para explicar inconsistencias en los interferogramas y gráficos de las funciones de correlación.