



Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Física

**RECONOCIMIENTO AUTOMÁTICO DE SEÑALES
SISMO VOLCÁNICAS EN EL VOLCÁN SANTIAGUITO,
GUATEMALA.**

Peter Darwin Argueta Ordoñez

Asesorado por Lic. Robin Onelio Yani Quiyuc y Lic. Amilcar Elías Roca Palma

Guatemala, Octubre 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

**RECONOCIMIENTO AUTOMÁTICO DE SEÑALES
SISMO VOLCÁNICAS EN EL VOLCÁN
SANTIAGUITO, GUATEMALA.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JEFATURA DEL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POR

PETER DARWIN ARGUETA ORDOÑEZ

ASESORADO POR LIC. ROBIN ONELIO YANI QUIYUC Y LIC. AMILCAR
ELÍAS ROCA PALMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

GUATEMALA, OCTUBRE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



CONSEJO DIRECTIVO

DIRECTOR M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
SECRETARIO ACADÉMICO M.Sc. Edgar Anibal Cifuentes Anléu

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR Dr. José Rodrigo Sacahuí Reyes
EXAMINADOR M.Sc. Osmar Obdulio Hernández Aguilar
EXAMINADOR Ing. Walter Giovanni Álvarez Marroquin



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



Ref. D.DTG. 008-2019
Guatemala 07 de octubre de 2019

El Director de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Coordinador de la Licenciatura en Física Aplicada, al trabajo de graduación Titulado: **RECONOCIMIENTO AUTOMÁTICO DE SEÑALES SISMO VOLCÁNICAS EN EL VOLCÁN SANTIAGUITO, GUATEMALA** presentado por el estudiante universitario **Peter Darwin Argueta Ordoñez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRIMASE.

MSc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Director
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas



AGRADECIMIENTOS

A mi madre, la luz en medio de toda esta oscuridad, que con amor espera mi regreso, gracias por escucharme siempre, por confiar en mi y por amarme tanto. A ella, que siempre será lo mejor que la vida pudo darme, no me alcanzarán los días que la vida nos permita estar juntos para devolverle todo lo que me ha dado.

A mi padre, por su amor. Porque siempre que de niño le enseñaba un invento me motivaba a seguir adelante. Gracias por compartir sus pensamientos, sus anécdotas y sus sueños. Gracias por enseñarme qué es lo importante de la vida. Aunque a veces somos distantes, su amor, su apoyo y sacrificios me dieron el valor para continuar adelante en la vida.

A Silvia, mi hermana, por toda la bondad y apoyo que me ha dado siempre. Es la mejor hermana mayor del mundo. A Fernanda, mi hermana, por enseñarme a leer y sobre todo por estar siempre para mi en los momentos más felices y más tristes de mi vida.

A mi amada Mama Naty, el pilar de nuestra familia y la mejor abuelita del universo. Al tío Daniel y a mi fallecida tía Gris, a la que no olvidaré jamás.

A mis sobrinas: Dayana, Daniela, Andrea. Empoderadas niñas que siempre con su creatividad y ocurrencia me hacen el tío más orgulloso del mundo.

A mi asesor Robin Yani, por aceptarme y darme la oportunidad de poder realizar mi trabajo de graduación en el departamento de Geofísica del INSIVUMEH. Gracias.

A mi asesor Amilcar Roca, por brindarme su conocimiento siempre de forma tan paciente, por sus explicaciones tan detalladas y por sus consejos. Gracias por

DEDICATORIA

*A los que sufren y a los que lloran.
A los estudiantes, mártires y desaparecidos.
A los líderes sociales, indígenas y campesinos.
A los que luchan por una educación gratuita, laica y de calidad.
A los niños, que con su creatividad, inocencia y amor dan esperanza al mundo.*

*Y sobre todo,
A todos aquellos olvidados,
que no tuvieron la oportunidad
que la vida muy injustamente me dio a mí.*

*"Y que todo lo escrito en ellos
era irreplicable desde siempre y para siempre,
porque las estirpes condenadas a cien años de soledad
no tenían una segunda oportunidad sobre la tierra."*

Gabriel García Márquez.

*Hay golpes en la vida, tan fuertes... ¡Yo no sé!
Golpes como del odio de Dios; como si ante ellos,
la resaca de todo lo sufrido
se empozara en el alma... ¡Yo no sé!*

*Son pocos; pero son... Abren zanjas oscuras
en el rostro más fiero y en el lomo más fuerte.
Serán tal vez los potros de bárbaros Atilas;
o los heraldos negros que nos manda la Muerte.*

*Son las caídas hondas de los Cristos del alma
de alguna fe adorable que el Destino blasfema.
Esos golpes sangrientos son las crepitaciones
de algún pan que en la puerta del horno se nos quema.*

*Y el hombre... Pobre... ¡pobre! Vuelve los ojos, como
cuando por sobre el hombro nos llama una palmada;
vuelve los ojos locos, y todo lo vivido
se empoza, como charco de culpa, en la mirada.*

Hay golpes en la vida, tan fuertes... ¡Yo no sé!

"Del libro Los heraldos negros (1918)", Cesar Vallejo.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS | X |
| OBJETIVOS | XI |
| INTRODUCCIÓN | XIII |
| 1. Actividad Sísmica en Volcanes | 1 |
| 1.1. Eventos Sismo Volcánicos | 1 |
| 1.1.1. Clasificación de Minakami | 1 |
| 1.1.1.1. Tipo A | 2 |
| 1.1.1.2. Tipo B | 2 |
| 1.1.1.3. Explosiones | 2 |
| 1.1.1.4. Micro Tremor | 2 |
| 1.1.2. Señales transitorias | 3 |
| 1.1.2.1. Eventos Volcano-Tectonicos | 3 |
| 1.1.2.2. Eventos de baja frecuencia | 4 |
| 1.1.2.3. Eventos Híbridos | 4 |
| 1.1.2.4. Explosiones | 4 |
| 1.1.3. Señales continuas | 4 |
| 1.1.3.1. Tremor Volcánico | 4 |
| 1.1.3.2. Ruido Ambiental | 5 |
| 2. Análisis de datos Sismo Volcánicos | 7 |
| 2.1. Archivos de Onda | 7 |
| 2.2. Software | 7 |
| 2.2.1. Swarm | 7 |
| 2.2.2. SAC -Seismology Analysis Code | 8 |
| 2.3. Algoritmo STA/LTA | 8 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.3.1. | Duración de la ventana promedio de corto tiempo (STA) | 9 |
| 2.3.2. | Duración de la ventana promedio de largo plazo (LTA) | 9 |
| 2.4. | Programa REDPy | 10 |
| 3. | Complejo Volcánico Santa María - Santiaguito | 13 |
| 3.1. | Descripción General del Volcán Santiaguito | 14 |
| 3.1.1. | Forma y Estructura Volcánica | 14 |
| 3.2. | Actividad Volcánica | 14 |
| 3.2.1. | Amenazas en el Volcán Santiaguito | 15 |
| 3.3. | Estaciones de Monitoreo Sísmico | 16 |
| 4. | Catálogo de Eventos Sismo Volcánicos del Volcán Santiaguito | 19 |
| 4.1. | Datos disponibles para el análisis | 19 |
| 4.2. | Estación de referencia | 20 |
| 4.3. | Eventos seleccionados | 21 |
| 5. | Detección de eventos Sismo Volcánicos | 23 |
| 5.1. | Resultados del algoritmo STA/LTA | 23 |
| 5.1.1. | Eventos reconocidos por el algoritmo STA/LTA | 23 |
| 5.2. | Resultados de REDPy | 26 |
| 5.2.1. | Resultados de Julio 2018 | 28 |
| 5.2.2. | Resultados de Agosto 2018 | 29 |
| 5.2.3. | Resultados de Septiembre 2018 | 30 |
| 5.2.4. | Resultados de Octubre 2018 | 31 |
| 5.2.5. | Resultados de Noviembre 2018 | 32 |
| 5.2.6. | Resultados de Diciembre 2018 | 33 |
| 5.2.7. | Familia 0 | 34 |
| 5.2.8. | Familia 2 | 38 |
| 5.2.9. | Familia 3 | 42 |
| 5.2.10. | Familia 5 | 46 |
| 5.3. | Discusión de Resultados | 50 |
| 5.3.1. | Algoritmo STA/LTA | 50 |
| 5.3.2. | REDPy | 50 |
| 5.3.2.1. | Familias de REDPy asociadas a eventos volcánicos | 50 |
| 5.3.2.2. | Comparación con lo boletines vulcanológicos del personal de INSIVUMEH | 53 |

| | |
|---|-----------|
| CONCLUSIONES | 61 |
| RECOMENDACIONES | 63 |
| BIBLIOGRAFÍA | 65 |
| A. Anexos | 69 |
| A.1. Catálogo de eventos | 69 |
| A.2. Resultados del algoritmo STA/LTA implementado en la actividad del volcán Santiguito | 69 |
| A.3. Resultados de REDPy | 71 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 1.1. Clasificación de Minakami de Sismos Volcánicos | 3 |
| 2.1. Ejemplo de disparo STA/LTA. | 10 |
| 3.1. Complejo Volcánico Santiaguito | 13 |
| 3.2. Imagen del complejo Santa María Santiaguito, la ubicación es en el departamento de Quetzaltenango, Guatemala. | 15 |
| 3.3. Red de monitoreo actual para Santiaguito, Febrero 2019. | 17 |
| 4.1. Disponibilidad de datos para hacer el análisis | 19 |
| 4.2. Espectrograma de las señales sísmo volcánicas recibidas por las esta- ciones STG2, STG5, STG8 | 20 |
| 5.1. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 24 |
| 5.2. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 24 |
| 5.3. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 25 |
| 5.4. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 25 |
| 5.5. Histograma de Familias creadas con REDPy | 27 |
| 5.6. Histograma de Familias del mes de julio 2018. | 28 |
| 5.7. Histograma de Familias del mes de agosto 2018. | 29 |
| 5.8. Histograma de Familias del mes de septiembre 2018. | 30 |
| 5.9. Histograma de Familias del mes de octubre 2018. | 31 |
| 5.10. Histograma de Familias del mes de noviembre 2018. | 32 |
| 5.11. Histograma de Familias del mes de diciembre 2018. | 33 |
| 5.12. Espectro de Fourier de la familia 0. | 34 |

| | |
|--|----|
| 5.13. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 0, primer ejemplo | 35 |
| 5.14. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 0, segundo ejemplo | 36 |
| 5.15. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 0, tercer ejemplo | 37 |
| 5.16. Espectro de Fourier, familia 2. | 38 |
| 5.17. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 2, primer ejemplo | 39 |
| 5.18. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 2, segundo ejemplo | 40 |
| 5.19. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 2, tercer ejemplo | 41 |
| 5.20. Espectro de Fourier, familia 3. | 42 |
| 5.21. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 3, primer ejemplo | 43 |
| 5.22. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 3, segundo ejemplo | 44 |
| 5.23. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 3, tercer ejemplo | 45 |
| 5.24. Espectro de Fourier, familia 5. | 46 |
| 5.25. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 5, primer ejemplo | 47 |
| 5.26. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 5, segundo ejemplo | 48 |
| 5.27. Evento sismo volcánico detectado automáticamente por REDPy. Familia 5, tercer ejemplo | 49 |
| | |
| A.1. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 69 |
| A.2. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 70 |
| A.3. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 70 |
| A.6. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 70 |

| | |
|--|----|
| A.4. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 71 |
| A.5. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA | 71 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| 3.1. Características del Volcán Santiaguito | 14 |
| 3.2. Estaciones Sísmicas en el Volcán Santiaguito | 16 |
| 5.1. Parámetros STA, LTA, Trigger On/Off para la actividad volcánica en el complejo Santiaguito | 23 |
| 5.2. Parámetros utilizados para la correcta configuración de REDPy en el complejo volcánico Santiaguito | 26 |
| 5.3. Información de los resultados de REDPy | 26 |
| 5.4. Características de la Familia 0 | 34 |
| 5.5. Características de la Familia 2 | 38 |
| 5.6. Características de la Familia 3 | 42 |
| 5.7. Características de la Familia 5 | 46 |
| 5.8. Eventos sismo volcánicos que se asocian a las familias encontradas con REDPy | 51 |
| 5.9. Familias de eventos sísmicos creadas con REDPy que se asocian a un evento volcánico | 51 |
| 5.10. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 1 | 53 |
| 5.11. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 2 | 54 |
| 5.12. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 3 | 55 |
| 5.13. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 4 | 55 |
| 5.14. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 5 | 56 |
| 5.15. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 6 | 57 |

| | |
|--|----|
| 5.16. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 7 | 58 |
| 5.17. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 8 | 58 |
| 5.18. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 9 | 59 |
| 5.19. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 10 | 60 |

OBJETIVOS

General

Implementar un programa de Reconocimiento Automático de Señales Sismo volcánicas para el Volcán Santiaguito, Guatemala.

Específicos

1. Elaborar un catálogo de eventos sismo volcánicos para el volcán Santiaguito.
2. Configurar los parámetros del programa REDPy [1] para la correcta detección de eventos sismo volcánico en el volcán Santiaguito.
3. Contrastar los resultados obtenidos con los boletines de la actividad volcánica en Santiaguito, elaborados por el personal de vulcanología del INSIVUMEH [3] .

INTRODUCCIÓN

El Volcán de Santiaguito es un complejo volcánico activo ubicado en el departamento de Quetzaltenango, Guatemala; éste no ha detenido su actividad desde que se formó en 1902 [5], además que es uno de los más violentos debido a que puede generar erupciones peleanas ¹ [6]. Este volcán es monitoreado por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) [3] por medio de sus estaciones sísmicas ubicadas en diferentes puntos del Volcán Santiaguito. La actividad volcánica representa un peligro para las comunidades cercanas al volcán. El constante monitoreo de los volcanes se basa en el análisis de las señales recibidas por las estaciones sísmicas, señales que pueden ser indicadores de distintos eventos en la actividad volcánica, pero la cantidad de datos recibidos supone un problema a la hora de analizar dichas señales sísmicas.

Este estudio ha utilizado los datos registrados en las estaciones sísmicas (STG5, STG2, STG8) en el período de 15 de diciembre de 2018 al 31 de diciembre 2018, segmentando períodos donde se presenten un eventos sísmicos, clasificando los archivos de onda se ha elaborado una base de datos para implementar el algoritmo STA/LTA [10]. El programa REDPy [1] se ha implementado en la fechas del 4 de julio de 2018 al 31 de diciembre de 2018 para poner a prueba la detección automática del programa los resultados se han contrastados con los boletines vulcanológicos realizados por el personal de INSIVUMEH [3].

Los resultados de este trabajo sobre la implementación del sistema automático capaz de detectar y clasificar eventos sismo volcánicos de manera sistemática permitirá una gestión más eficaz al monitoreo de la actividad del Volcán Santiaguito.

¹Es un tipo de erupción volcánica caracterizado por producir lava muy viscosa y muchos gases volcánicos.

1. Actividad Sísmica en Volcanes

Uno de los propósitos principales para el estudio de la sismología volcánica es el de conocer los patrones de actividad sísmica que permitan establecer el comportamiento del volcán.

Mediante el estudio de los sismos registrados en los volcanes la sismología volcánica pretende describir las fuentes y la dinámica de los procesos físicos del magma y fluidos hidrotermales que generan estos eventos sísmicos para caracterizar su evolución y localización. Toda esta información constituye una herramienta fundamental de la geofísica para comprender la estructura interna, analizar los episodios eruptivos y evaluar el riesgo asociado a un volcán. [12]

1.1. Eventos Sismo Volcánicos

Para poder entender y estudiar la sismicidad de un volcán se necesita determinar y caracterizar las señales que se reciben de las estaciones sísmicas.

Éstas señales se deben clasificar según su forma de onda. La primera y muy popular clasificación de sismos volcánicos fue propuesta por Minakami (1960,1974), esta clasificación toma en cuenta la localización del foco, su relación con las erupciones y la naturaleza del movimiento sísmico [15].

1.1.1. Clasificación de Minakami

La clasificación de Minakami es la siguiente:

1. Tipo A
2. Tipo B

3. Explosiones

4. Micro Tremor

1.1.1.1. Tipo A

Éstos tienen apariencia muy parecida a los tectónicos, normalmente se presentan a profundidades hasta de 1 a 20 km y con carácter impulsivo en sus fases iniciales. Son generalmente menores a 6^1 en magnitud [15].

1.1.1.2. Tipo B

Hipocentros cercanos al cono activo, son de poca profundidad y muestran un aumento gradual de sus amplitudes en el tiempo, por lo que no es muy clara la onda S. Están constituidos por ondas superficiales y las magnitudes son generalmente muy pequeñas [15].

1.1.1.3. Explosiones

Presentan una longitud de onda larga que es comparable con los del Tipo A y sismos tectónicos. Se acompañan con erupciones explosivas individuales y la magnitud de éstos sismos está relacionada con la actividad eruptiva. [15].

1.1.1.4. Micro Tremor

Se caracteriza por ondas superficiales, presenta amplitudes constantes y su frecuencia es estable, éstos pueden formar enjambres y ocurren en diferentes etapas de la actividad sísmica [15].

En la figura 1.1 se muestran algunos ejemplos de la clasificación hecha por Minakami:

¹Magnitud local

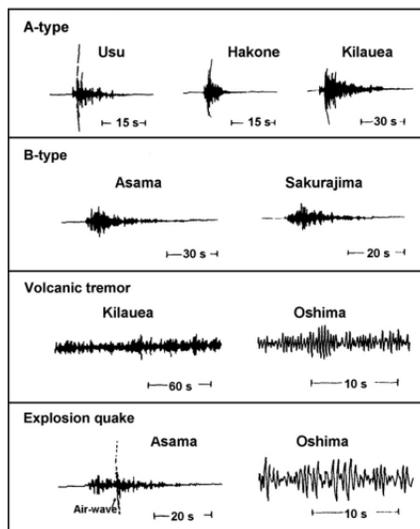


Figura 1.1. Ilustración de la clasificación de Minakami de los Sismos Volcánicos
Fuente:[15]

Otra forma de clasificar las señales sismo volcánicas es dividiéndolas entre señales transitorias y señales continuas.

1.1.2. Señales transitorias

1.1.2.1. Eventos Volcano-Tectonicos

Estos eventos pueden ser profundos o superficiales.

Los profundos (**VT-A**) (por debajo de unos 2 km) se manifiestan por la clara llegada de las ondas P y S y su contenido de alta frecuencia ($> 5\text{Hz}$). Ésto lleva también al evento de alta frecuencia de nombre (HF) [16].

Los eventos **VT** son causados por la acumulación de estrés debido que resulta en un deslizamiento similar a la falla tectónica. Siguen una distribución tipo enjambre pero no siguen la usual distribución llamada *Main-After Shock* [16].

Los superficiales (**VT-B**) (por encima de aproximadamente 1-2 km) muestra mas emergente la onda P, y a veces, incluso es imposible detectar cualquier onda S. Contienen frecuencias más bajas ($1 - 5\text{Hz}$) [16].

1.1.2.2. Eventos de baja frecuencia

Los eventos de baja frecuencia (*LF* o *Período largo-LP*) no muestran llegadas de onda S. El contenido de frecuencia está restringido en su mayoría en una estrecha Banda entre 1 – 3Hz. Las fuentes LF a menudo están situadas en la parte poco profunda del volcán (< 2 km). No existe una descripción exacta del modelo fuente para este tipo de eventos [16].

Las fuentes pueden ser movimientos de fluidos o perturbaciones de presión en el conducto magmático superior [18].

1.1.2.3. Eventos Híbridos

Algunas señales volcánicas y sísmicas comparten las características de señal y frecuencia por ejemplo, eventos LP y VT- (A, B). Las señales de esta clase se etiquetan generalmente como eventos híbridos, que pueden reflejar una posible mezcla de mecanismos fuente de ambos tipos de eventos. Por ejemplo, un micro terremoto VT puede desencadenar un evento LP cercano [16].

1.1.2.4. Explosiones

Las señales de estos eventos son muy pequeñas, en su rango de frecuencia. Esta clase de señales viene acompañada de explosiones estrombolianas u otras explosiones más grandes, la mayoría de estas señales pueden ser identificadas por la ocurrencia de una onda de aire causada por el impulso sónico durante una explosión [16].

1.1.3. Señales continuas

Las señales continuas en volcanes demuestra la diferencia que existe entre la sismología tectónica y la sismología volcánica. Los candidatos para estas señales son: desprendimientos de rocas, deslizamientos de tierra, flujo de densidad piroclástica y tremor volcánico [16].

1.1.3.1. Tremor Volcánico

Las señales de tremor pueden durar minutos o meses, y, en la mayoría de los casos, sus espectros son de banda muy estrecha (1 – 5Hz) [16].

El tremor volcánico está asociado al movimientos de fluidos dentro del edificio volcánico, por lo que éste puede ser indicador de erupción volcánica, pero se debe de recordar que cada volcán es diferente y se necesita caracterizar su actividad.

1.1.3.2. Ruido Ambiental

La mayoría de volcanes en Guatemala tiene comunidades cercanas, por lo que la actividad humana representa una señal de fondo, la cuál se debe tratar con precaución debido a que esta actividad no es igual en el día que en la noche. El espectro de banda de estas señales puede estar en cualquier rango de frecuencias.

2. Análisis de datos Sismo Volcánicos

2.1. Archivos de Onda

Los archivos de onda son de formato MiniSEED [17], contienen 3 componentes, pero en este trabajo sólo se utilizará la componente vertical. Cada uno de los archivos tiene la actividad sísmica de un día en horario UTC¹, éstos se segmentan con Swarm [7] para convertirlo a formato SAC [8] y analizar cada forma de onda por individual. Los archivos se nombran de la forma: GI.ESTACIÓN.COMPONENTE.MES.AÑO.DÍA

Ejemplo:

GI.STG0.HHZ.D.2019.024

Con ésto se sabe la fecha con la que se esta trabajando y esto ayudará con la comparación de los resultados con los boletines elaborados por el personal de Vulcanología del INSIVUMEH [3].

2.2. Software

2.2.1. Swarm

Swarm es una aplicación Java diseñada para mostrar y analizar formas de onda sísmicas en tiempo real. Swarm puede conectarse y leer desde una variedad de diferentes fuentes de datos estáticos y dinámicos. Swarm tiene herramientas de análisis de dominio de tiempo y frecuencia, junto con una plataforma de mapeo simple pero poderosa. Swarm fue escrito por y para científicos y proporciona un control preciso sobre diferentes configuraciones y variables de programas. El código es de código abierto, disponible de forma gratuita y en el dominio público [7].

¹Tiempo universal coordinado

Swarm fue desarrollado en 2004 y 2005 en el Observatorio de Volcanes de Alaska por Dan Cervelli, Peter Cervelli, Thomas Parker y Thomas Murray. [7]

2.2.2. SAC -Seismology Analysis Code

SAC, antes conocido como *SAC2000* [9] es un programa diseñado para el estudio de señales secuenciales, especialmente datos en serie de tiempo [8].

Las capacidades de análisis incluyen operaciones aritméticas generales, transformadas de Fourier, tres técnicas de estimación espectral, filtrado, apilamiento de señales, interpolación, correlación y selección de fase sísmica. SAC también contiene una amplia capacidad de gráficos [8].

2.3. Algoritmo STA/LTA

STA/LTA es un algoritmo de detección de cambios en la amplitud sísmica, éste mantiene un seguimiento constante de la amplitud del ruido sísmico en la estación y cambia los parámetros de sensibilidad de ruido de la misma. Ésto da como resultado una mejor eficacia, dado que tenemos más sensibilidad en un evento sismo volcánico y se previene el número excesivo de datos en los períodos de ruido ambiental.

Su nombre significa en inglés: **Short Time Average / Long Time Average** y en español: **Promedio a corto plazo / Promedio a largo plazo**. El **STA** es la ventana de tiempo corto, en ella se encuentra el evento sismo volcánico. El **LTA** es la ventana de tiempo largo y toma el promedio de la amplitud del ruido [10].

Primero, se calcula la amplitud absoluta de cada muestra de datos de una señal entrante. Seguido, se calcula el promedio de las magnitudes absolutas en ambas ventanas. En otro paso, una relación de ambos valores (razón STA / LTA) es calculado. Este radio es continuamente comparado con un valor seleccionado. En otras palabras, suponemos que contamos con una serie de tiempo unidimensional de largo $N + M$ compuesta por números reales s_i con $i = M, \dots, N$ donde se encuentra un evento sísmico. El promedio a corto plazo es:

$$s^{corto} = \frac{1}{T^{corto}} \sum_{j=i-T^{corto}}^i s_j^2 \quad (2.1)$$

Donde T^{corto} representa intervalo de corto plazo a estudiar.

El promedio a largo plazo está dado por:

$$s^{largo} = \frac{1}{T^{largo}} \sum_{j=i-T^{largo}}^i s_j^2 \quad (2.2)$$

Donde T^{largo} representa el intervalo de largo plazo. La razón STA/LTA es la nueva serie de tiempo:

$$S = \frac{s^{corto}}{s^{largo}} \quad (2.3)$$

Los valores establecidos, con los cuales se comparará se definirán cómo: **Trigger On** que es el activador de disparo y **Trigger Off** que es el desactivador de disparo. Estos dos valores se seleccionan de acuerdo a la gráfica de la razón STA/LTA.

El parámetro de activación STA / LTA y la configuración de los parámetros de disparo dependen de los objetivos del estudio ,el ruido sísmico en el lugar, en las propiedades de las señales sísmicas, y en el tipo de sensor utilizado, no existe una regla común y única para establecerlos todos.

Se muestra un ejemplo de como funciona este algoritmo en la imagen 2.1.

2.3.1. Duración de la ventana promedio de corto tiempo (STA)

La ventana promedio a corto plazo mide el valor “instantáneo” de una señal sísmica o la mayor parte de ella, la duración de STA debe ser mayor que unos pocos períodos de una señal sísmica anticipada regularmente. Cuanto más corto es el valor elegido mayor será la sensibilidad del disparador y si es elegido con un valor muy grande este será menos sensible, esta condición es decisivo con respecto a los disparadores falsos.

2.3.2. Duración de la ventana promedio de largo plazo (LTA)

La ventana promedio a largo plazo mide el ruido sísmico de amplitud media. Éste parámetro debería de medir más de unos períodos del cambio del ruido sísmico habitualmente esporádicos. Una corta duración de LTA permite que el valor de LTA amplíe gradualmente la amplitud de nuevas ondas sísmicas. Si el LTA es más largo

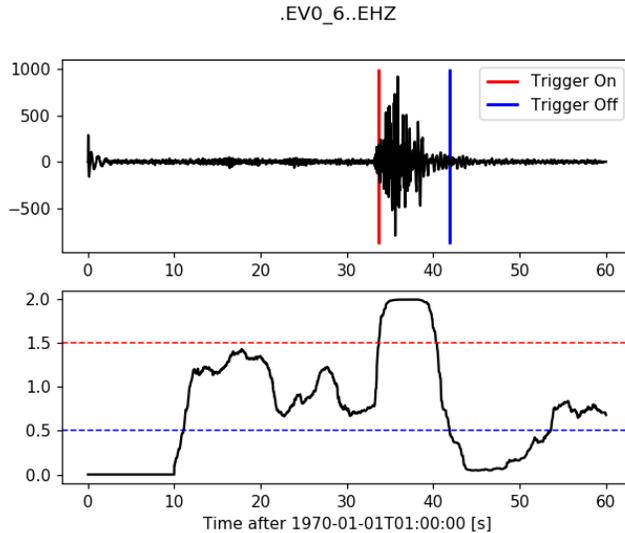


Figura 2.1. Ejemplo de disparo STA/LTA. La imagen de arriba se muestra una señal típica de un evento sísmico. En la línea roja se inicia el disparo, en la línea azul se termina la detección del evento. En la segunda imagen se muestra la nueva serie de tiempo STA/LTA. En la línea punteada roja se denota el umbral que debe de sobrepasar para activar el disparo y la línea punteada azul denota el umbral para desactivar el disparo. *Fuente: [20]*

activa la sensibilidad a los sismos emergentes.

2.4. Programa REDPy

REDPy (Detector de eventos sísmicos repetitivos), es una herramienta para la detección y análisis automatizados de eventos sísmicos repetitivos en datos continuos. Funciona sin suposiciones previas de cómo se ve la sismicidad repetida (es decir, no requiere un evento modelo). Los eventos sísmicos repetidos se agrupan en familias² que se forman usando correlación cruzada entre múltiples estaciones.[1]

REDPy[1] utiliza el algoritmo STA/LTA [10] para poder identificar un evento sísmico. Los datos de los eventos sísmicos se almacenan en tablas con extensión .h5³. Cuando se activan las estaciones requeridas por el usuario, un nuevo evento se crea y luego se usa en una serie de correlaciones cruzadas en el dominio de la frecuencia para compararlas con otros eventos en el catálogo. Si un nuevo evento coincide con uno previamente definido como un evento falso, REDPy salta al siguiente evento. Si

²Conjunto de eventos sísmicos que tienen características comunes.

³El HDF5 (hierarchical dataset format, <http://www.hdfgroup.org/HDF5/>) es un formato que permite almacenar eficientemente grandes volúmenes de datos

el nuevo evento no se correlaciona con ninguno de los eventos, el sistema escribe ese evento en una tabla huérfana. A medida que el programa continúa, REDPy analiza cada evento en comparación con los eventos en la tabla huérfano para determinar un coeficiente de correlación cruzada. Si un nuevo evento se correlaciona con un evento huérfano por encima del umbral de correlación la estaciones requeridas, esos eventos correlacionados se mueven de la tabla huérfano y se agrupan como una familia [21].

Para crear las familias de eventos sísmicos se utiliza el algoritmo de estructura de agrupamiento (OPTICS) [22]

El programa REDPy se puede encontrar en [2]

3. Complejo Volcánico Santa María - Santiaguito

El complejo volcánico Santa María-Santiaguito forma parte de la cadena volcánica cuaternaria de Guatemala que cruza el país paralela a la planicie costera del Pacífico. Se estima que Santa María ha mantenido actividad durante los últimos 28,000 años y después de algunos miles de años de reposo, despertó repentinamente con una violenta erupción en el año 1,902 que arrojó 20 km³, dejando un extenso cráter en donde desde 1,922 al presente, han crecido cuatro domos que en conjunto son llamados el volcán Santiaguito. [4]



Figura 3.1. Complejo Volcánico Santiaguito. *Fuente: Fotografía tomada por el personal de INSIVUMEH [3]*

3.1. Descripción General del Volcán Santiaguito

3.1.1. Forma y Estructura Volcánica

El Volcán Santiaguito está formando de cuatro domos de lava con orientación preferentemente este-oeste que han surgido desde 1,922 del interior del cráter de la erupción de 1,902 del Santa María. Los domos tienen crecimiento endógeno y exógeno en cráteres laterales y extrusión ¹ de flujos de lava, presentando morfología de empinadas capas o espinas de lava, lo que dificulta el ascenso a este tipo de estructuras volcánicas.

Los domos del Volcán Santiaguito reciben los nombres de: **Caliente, La Mitad, El Monje y El Brujo**, mencionados en el orden de su nacimiento. Migrando la actividad en ellos, en la actualidad el Domo Caliente es el foco eruptivo activo.

Algunas características importantes del Volcán Santiaguito se muestran en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Características del Volcán Santiaguito. Fuente: Tomada de [4]

| Parámetro | Descripción |
|--|--------------------------------|
| Tipo de Volcán | Domo dacíticos ² |
| Tipo de Erupción | Vulcaniana-Peleana |
| Índice de Explosividad Volcánica (IEV) | 4 [11] |
| Ubicación | Departamento de Quetzaltenango |
| Posición geográfica | 14°44'33" N y 91°34'13" W |
| Altitud | 2,500 msnm |

3.2. Actividad Volcánica

El complejo Santa María-Santiaguito desarrolla una historia en tres fases de actividad: período de crecimiento del estratovolcán (durante casi 28,000 años), la dramática erupción pliniana³ de 1,902 y el crecimiento del complejo de domos dacíticos de Santiaguito desde 1,922 hasta el presente [4].

En la siguiente imagen se muestra el Complejo Santa María Santiaguito:

¹Afloración del magma a la superficie terrestre.

³Erupción volcánica que forman una columna eruptiva que puede alcanzar más de 55km de altura, dispersando fragmentos sobre un área de 500 a 5,000 km² [19]

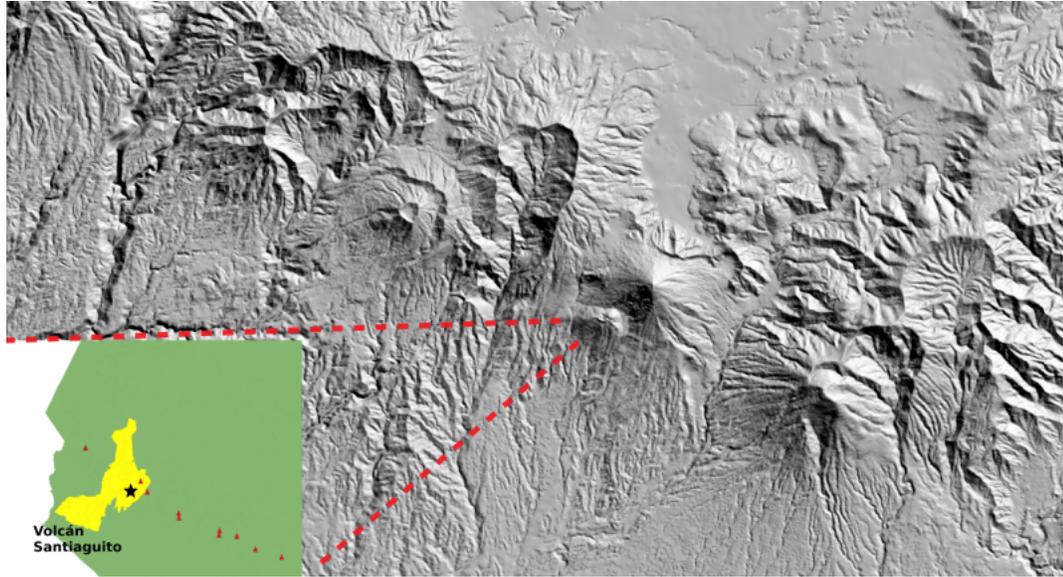


Figura 3.2. Imagen del complejo Santa María Santiaguillo, ubicado en el departamento de Quetzaltenango, Guatemala. *Fuente:Procesamiento propio*

En la última fase el Santiaguillo ha presentado una actividad consistente en alternancia de crecimiento endógenos y exógenos. Desde 1,977 la actividad está centrada en el Domo Caliente con explosiones verticales y efusión de coladas de lava en bloques desde la cúpula, donde en ocasiones se forman espinas y producen constantes derrumbes de bloques levantando nubes de ceniza y gases en el trayecto de descenso. Parciales colapsos de la cúpula de lava emplazada en el cráter central, forman flujos y oleadas piroclásticas que en ocasiones barren muchos km^2 de la superficie del terreno [4].

Las explosiones del Volcán Santiaguillo, generalmente de 1 a 4 por hora, expulsan gases y ceniza desde 300 a 1,500 m hacia la atmósfera y en erupciones violentas han alcanzado 5,000 m por encima del cráter. La ceniza producto de las explosiones, frecuentemente cae sobre el complejo de domos a varios kilómetros, de acuerdo al patrón de vientos estacionales y en las erupciones violentas ha caído ceniza de grano muy fino en el sur-occidente del país y frontera mexicana [4].

3.2.1. Amenazas en el Volcán Santiaguillo

Los eventos que presenta el Volcán Santiaguillo que representan un peligro para las comunidades cercanas a dicho volcán son:

1. Lahares ⁴ .
2. Colapso, ruptura del domo.
3. Flujos piroclásticos ⁵.
4. Caída de ceniza.
5. Flujos de lavas (bloques).

3.3. Estaciones de Monitoreo Sísmico

El Volcán Santiaguito cuenta con estaciones de período corto y de período largo. La cantidad de estaciones en principio son 6 pero sólo se encuentran en servicio 4 de ellas, 2 estaciones cubren el flanco norte y otras 2 cubren el flanco sur del complejo volcánico. Éstas envían señal telemétrica a las oficinas centrales del INSI-VUMEH [3], donde se procesan y se analizan para poder determinar a qué evento sísmico volcánico pertenece.

La localización geográfica de cada una de las estaciones se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Estaciones Sísmicas en el Volcán Santiaguito

| Nombre de la Estación | Posición geográfica |
|------------------------------|----------------------------|
| STG2 | 14°43'41" N y 91°37'54" W |
| STG5 | 14°42'65" N y 91°34'22" W |
| STG5 | 14°40'34" N y 91°34'84" W |
| STG7 | 14°46'00" N y 91°37'00" W |
| STG8 | 14°45'02" N y 91°35'10" W |

La siguiente imagen es un mapa elaborado por el personal de Vulcanología del INSIVUMEH [3], en él se muestra la ubicación de cada estación y su respectivo nombre:

⁴ Es un flujo de sedimento y agua que se moviliza desde las laderas de volcanes [14]

⁵ Es una mezcla de gases volcánicos calientes, materiales sólidos calientes y aire atrapado, que se mueve a nivel del suelo y resulta de ciertos tipos de erupciones volcánicas.[13]

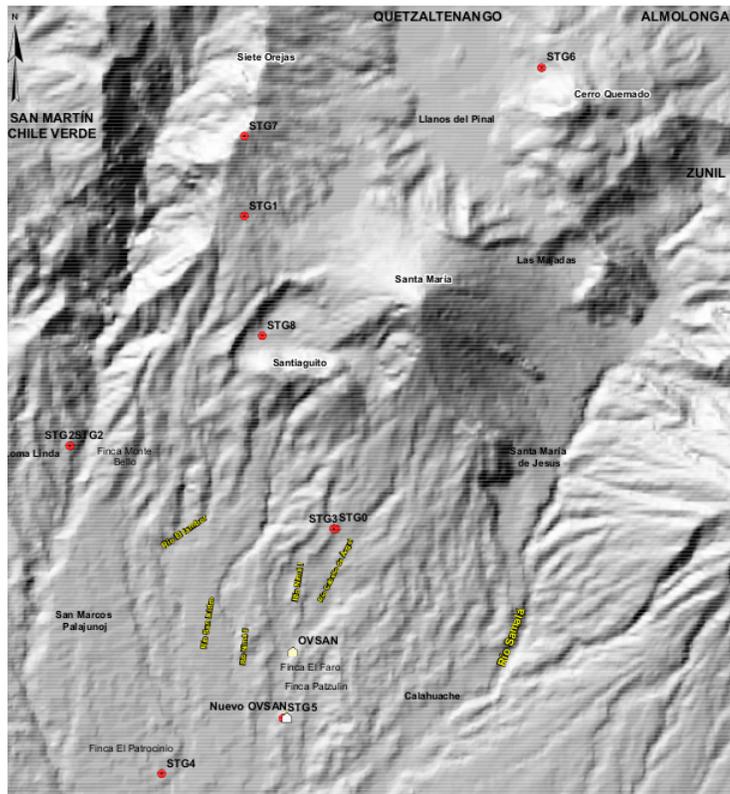


Figura 3.3. Red de monitoreo actual, Febrero 2019 *Elaborada por Francisco Juárez, INSIVUMEH*

4. Catálogo de Eventos Sismo Volcánicos del Volcán Santiaguito

4.1. Datos disponibles para el análisis

Revisando los datos disponibles para la implementación del algoritmo STA/LTA y el programa REDPy se encontró que se tenía datos del 4 de julio de 2018 al 31 de diciembre de 2018. Esto se muestra en la imagen siguiente:

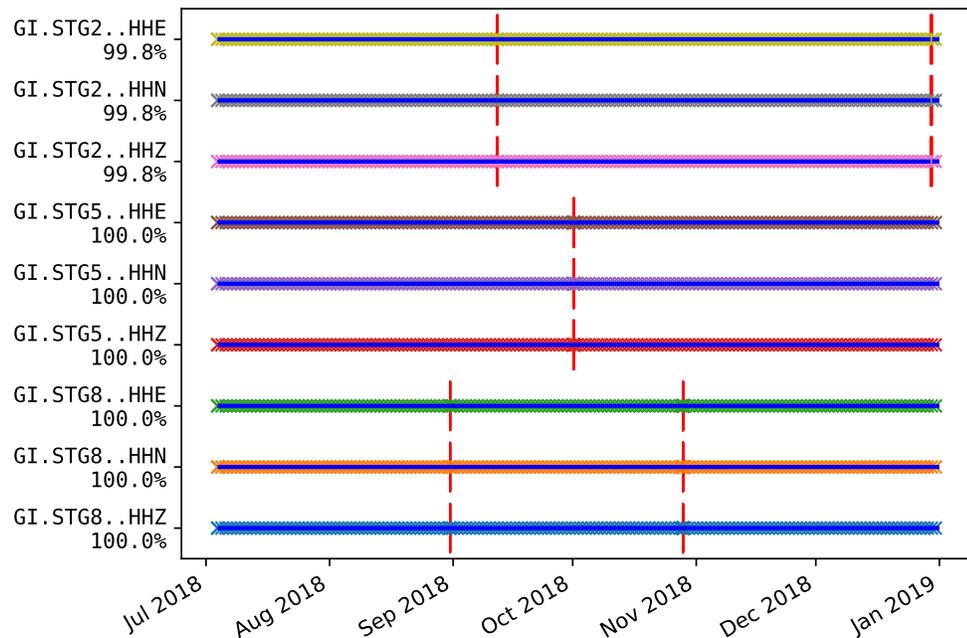
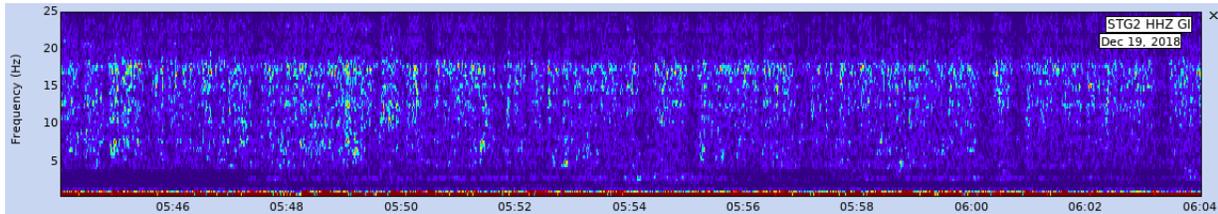


Figura 4.1. Disponibilidad de datos en las estaciones para hacer el análisis. Se muestran las estaciones STG2, STG5, STG8 con sus respectivos canales

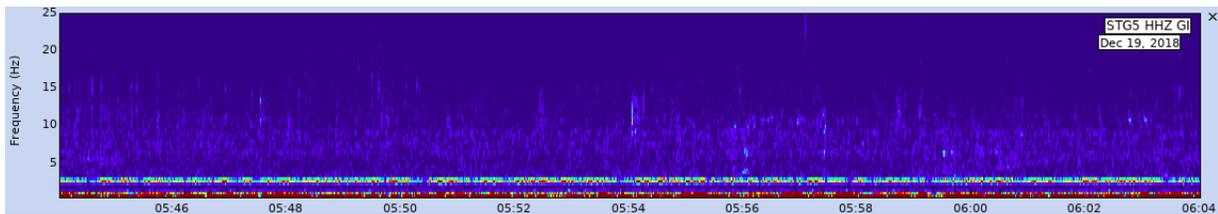
Dado los datos disponibles, el período de análisis se hizo del 15 de diciembre de 2018 al 31 de diciembre de 2018 para la implementación del algoritmo STA/LTA [10] y del 4 de julio al 31 de diciembre de 2018 para el programa REDPy [1].

4.2. Estación de referencia

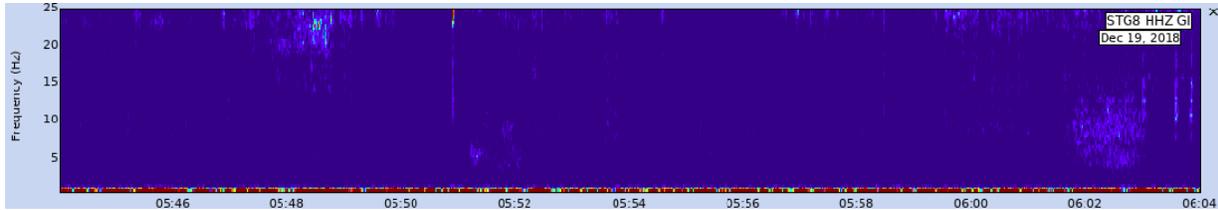
Para seleccionar la estación de referencia se observó las formas de onda de las señales recibidas por las estaciones sísmicas y su espectrograma correspondiente, seleccionando finalmente la que presentara un SNR ¹ más grande.



(a) Espectrograma de la estación STG2



(b) Espectrograma de la estación STG5



(c) Espectrograma de la estación STG8

Figura 4.2. El conjunto de imágenes representa el espectrograma de la señal recibida por las estaciones sísmicas STG2, STG5, STG8 respectivamente, éste espectrograma es cuando hay una actividad volcánica baja. *Fuente: Elaborado con Swarm [7]*

En el espectrograma de la estación STG2 que se observa en la figura 4.2 presenta bastante ruido en un rango de frecuencias de $(5 - 15)Hz$ posiblemente debido al viento. En el espectrograma de la estación STG5 de la figura 4.2 muestra un ruido constante en el rango de frecuencias entre $0 - 5Hz$, aunque es constante en el tiempo puede ocultar con eventos volcánicos, especialmente con explosiones o con eventos LP que corresponden a éstas frecuencias según [16]. El espectrograma de la estación STG8 de la figura 4.2 el SNR es mucho mayor que que en las estaciones anteriores.

¹Se define como la proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe

Por lo tanto la estación de referencia seleccionada fue STG8.

4.3. Eventos seleccionados

Teniendo la estación de referencia (STG8) se procedió a recortar distintos tipos de eventos sísmicos para poder configurar el algoritmo STA/LTA [10] en la estación de referencia.

Se segmentaron 288 archivos de onda donde se encuentran cerca de 499 eventos sísmicos en el período del 15 de diciembre de 2018 al 31 de diciembre de 2018. El catálogo de los períodos segmentados puede encontrarse en el anexo **A.1**. Los eventos segmentados representan los que más se repiten en la estación de referencia (STG8).

5. Detección de eventos Sismo Volcánicos

Se presentan los resultados de la implementación del algoritmo STA/LTA [10] en el período del 15 de diciembre de 2018 al 31 de diciembre de 2018 con la base de datos realizada. Se presentan también los eventos detectados con REDPy [1] en el periodo del 4 de julio de 2018 al 31 de diciembre de 2018.

5.1. Resultados del algoritmo STA/LTA

Los parámetros encontrados para el STA, LTA, Trigger On, Trigger Off se presentan en la tabla 5.1. **estos parámetros funcionan con el 88.57% de eventos sísmicos, es decir cerca de 442 eventos sísmicos.**

Tabla 5.1. Parámetros STA, LTA, Trigger On/Off para la actividad volcánica en el complejo Santiaguito, Guatemala

| Parámetros STA/LTA | Valor |
|--------------------|-------|
| STA (s) | 12 |
| LTA (s) | 40 |
| Trigger On | 2.20 |
| Trigger Off | 0.39 |

Se buscó un STA/LTA y valores para un Trigger On y un Trigger Off que tomaran la mayor parte eventos.

5.1.1. Eventos reconocidos por el algoritmo STA/LTA

Se presentan distintos eventos, implementando el reconocimiento automático del algoritmo STA/LTA:

En la figura 5.1 se observan dos recuadros: la primera es la señal sísmica, la línea roja representa el inicio del evento y la línea azul representa el final de dicho evento.

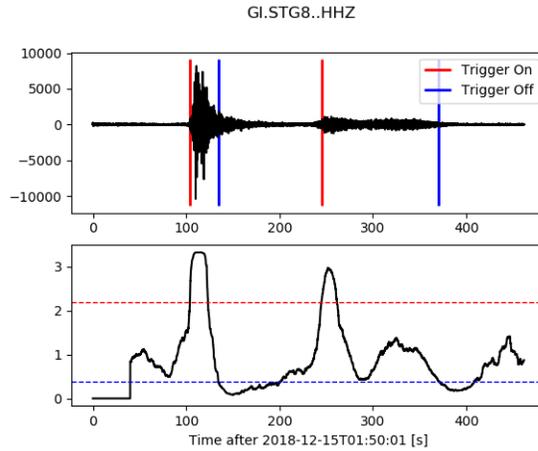


Figura 5.1. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA Fuente: *Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]*

La segunda imagen representa la nueva serie de tiempo de la relación STA/LTA con los parámetros dados en la tabla 5.1, esta gráfica presenta un comportamiento continuo, ésta crece cuando se presenta un evento y disminuye cuando el evento termina.

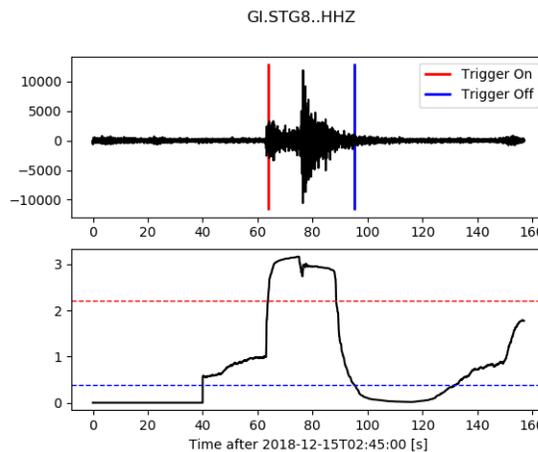


Figura 5.2. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA Fuente: *Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]*

En la figura 5.2 se presenta un evento que tiene una amplitud primaria y luego tiene una secundaria mayor, la curva STA/LTA se comporta tal como el evento volcánico, crece cuando inicia y disminuye cuando éste va terminando sin marcar un final del evento en la segunda amplitud.

La figura 5.3 es un ejemplo como el algoritmo de detección automático STA/L-

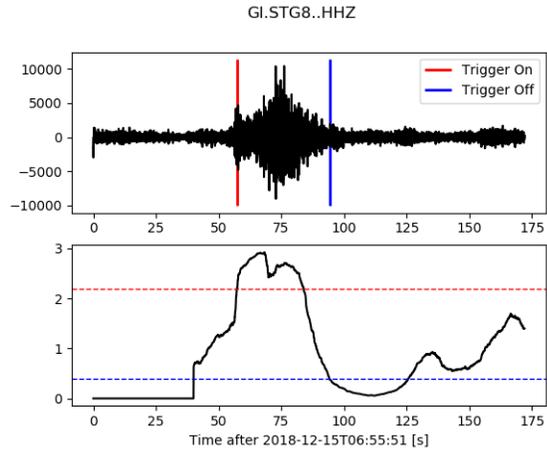


Figura 5.3. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA Fuente: Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]

TA funciona bastante bien, dado que en este ejemplo la amplitud del evento no crece de forma impulsiva sino que de forma emergente y así mismo termina. La curva de la relación STA/LTA muestra donde inicia el evento y donde termina con el valor de Trigger On y Trigger Off seleccionado.

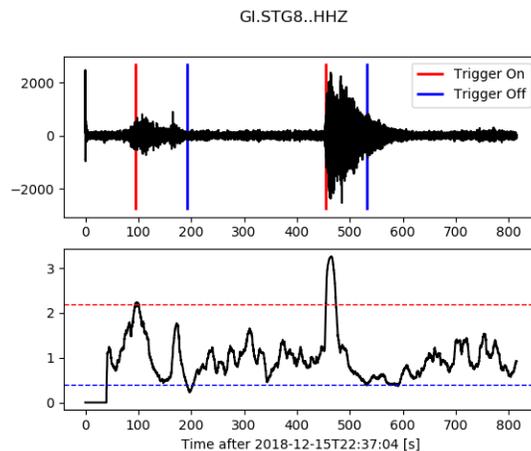


Figura 5.4. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA Fuente: Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]

Otro buen ejemplo que muestra el funcionamiento del algoritmo STA/LTA [10] es que no importa el orden de los eventos sísmicos, esto se puede observar si se compara la imagen 5.1 con la imagen 5.4.

En la sección del Anexo **A.2** se muestran más ejemplos de los resultados obtenidos con el algoritmo STA/LTA.

5.2. Resultados de REDPy

Los parámetros del archivo de configuración de REDPy [1] para el reconocimiento automático de señales sismo volcánicas en el volcán Santiaguito se presentan en la tabla 5.2, estos parámetros fueron elegidos de acuerdo a las capacidades que se tiene en el monitoreo del volcán.

Tabla 5.2. Parámetros utilizados para la correcta configuración de REDPy para la implementación en el volcán Santiaguito

| Parámetro | Valor |
|--|---------------|
| Número de estaciones | 3 |
| Filtro pasa banda min/max | 1.0Hz/20.0Hz |
| STA (s) / LTA (s) | 12/40 |
| Trigger On/Off | 2.20/0.39 |
| Tasa de muestreo | 100 |
| Longitud de ventana de correlación | 1024 muestras |
| Coefficiente de correlación mínimo | 0.65 |
| No. de estaciones para declarar un evento (según la correlación elegida) | 1 |
| No. de estaciones para que se declare un evento como repetido | 1 |

La información de las familias de eventos creados con REDPy para el periodo del 04 de julio del 2018 al 31 de diciembre del 2018 se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Información de los resultados de REDPy

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|--------------|
| Familias | 21 |
| No. de eventos repetidos | 2636 |

Se presenta el histograma de eventos detectados por REDPy[1].

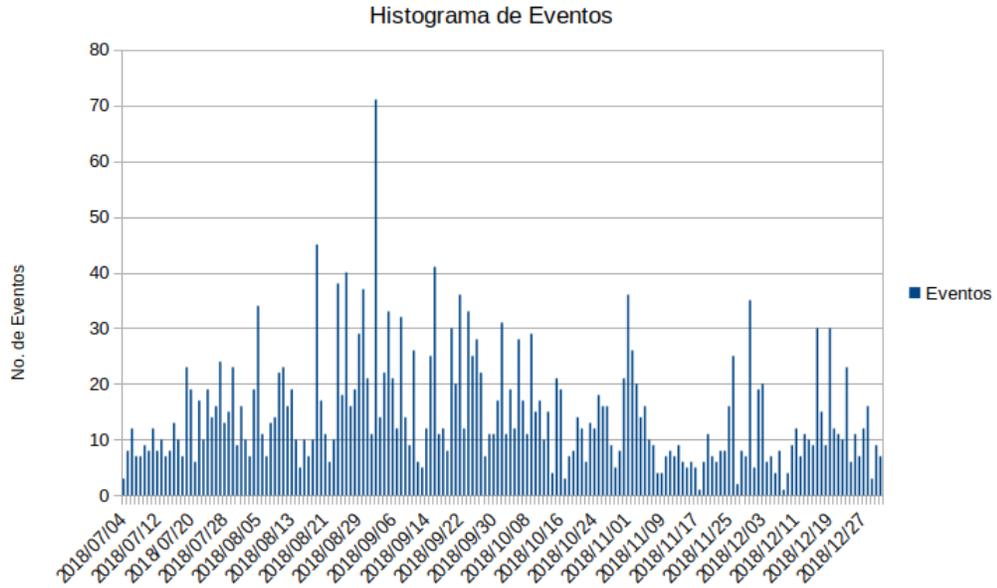


Figura 5.5. Histograma de Familias creadas con REDPy *Fuente: Elaboración propia*

En el histograma de la figura 5.5 se observa la cantidad de eventos totales en cada uno de los días en el período analizado. Para una mejor visualización, el histograma de eventos totales se separó en meses clasificando las familias que fueron creadas por REDPy [1].

5.2.1. Resultados de Julio 2018

El histograma de familias de eventos detectadas por REDPy [1] para el mes de Julio se presenta en la figura 5.6.

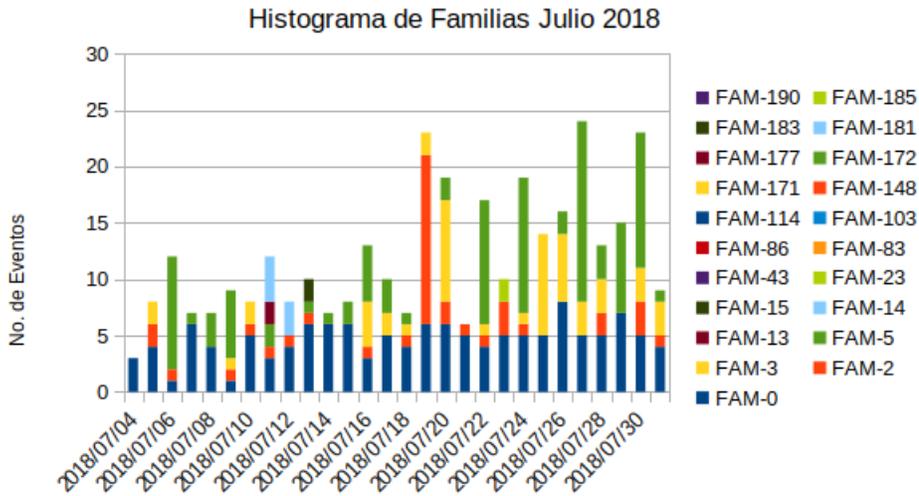


Figura 5.6. Histograma de Familias creadas con REDPy. Julio 2018. A la derecha se observa la clasificación en colores dada para cada una de las familias. *Fuente: Elaboración propia*

Las familias más representativas del mes de julio son, según el histograma de la figura 5.6: FAM-0, FAM-2, FAM-3, FAM-5.

5.2.2. Resultados de Agosto 2018

El histograma de familias de eventos detectadas por REDPy [1] para el mes de Julio se presenta en la figura 5.7.

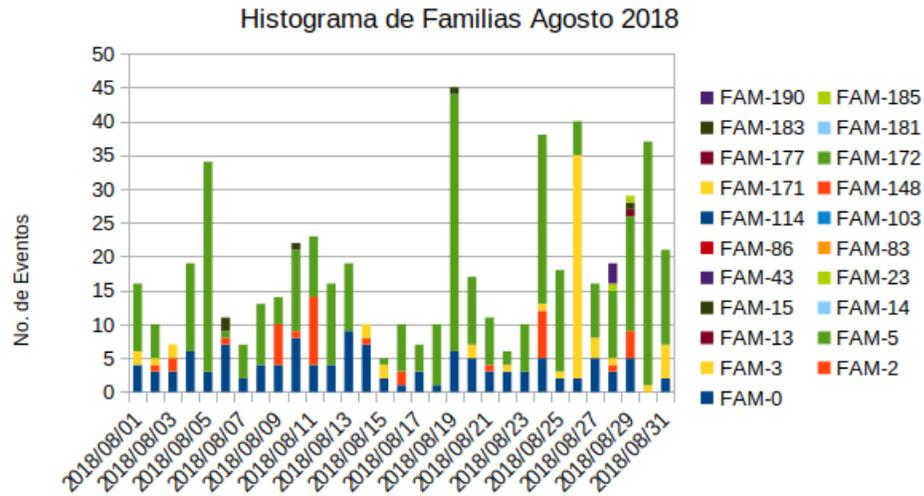


Figura 5.7. Histograma de Familias creadas con REDPy. Agosto 2018. A la derecha se observa la clasificación en colores dada para cada una de las familias. *Fuente: Elaboración propia*

Las familias más representativas del mes de agosto son, según el histograma de la figura 5.7: FAM-0, FAM3 y FAM-5.

5.2.3. Resultados de Septiembre 2018

El histograma de familias de eventos detectadas por REDPy [1] para el mes de Julio se presenta en la figura 5.8.

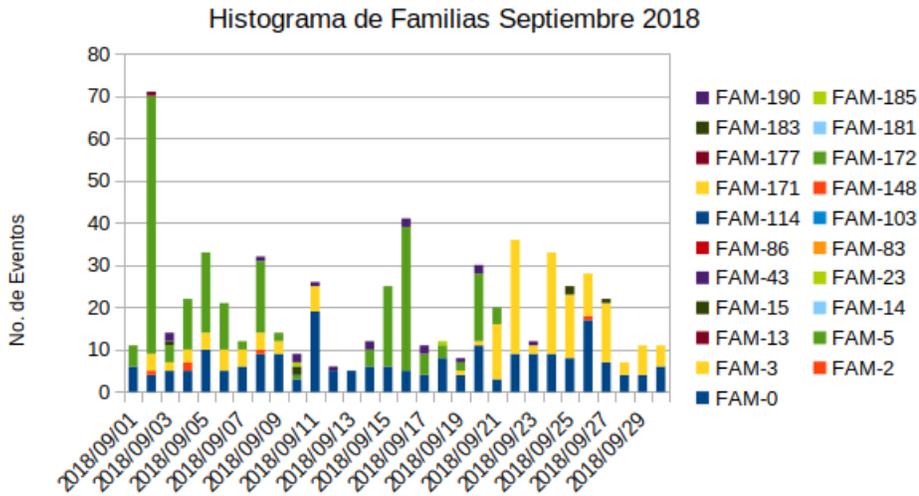


Figura 5.8. Histograma de Familias creadas con REDPy. Septiembre 2018. A la derecha se observa la clasificación en colores dada para cada una de las familias. *Fuente: Elaboración propia*

Las familias más representativas del mes de septiembre son, según el histograma de la figura 5.8: FAM-0, FAM-3, FAM-5

5.2.4. Resultados de Octubre 2018

El histograma de familias de eventos detectadas por REDPy [1] para el mes de Octubre se presenta en la figura 5.9.

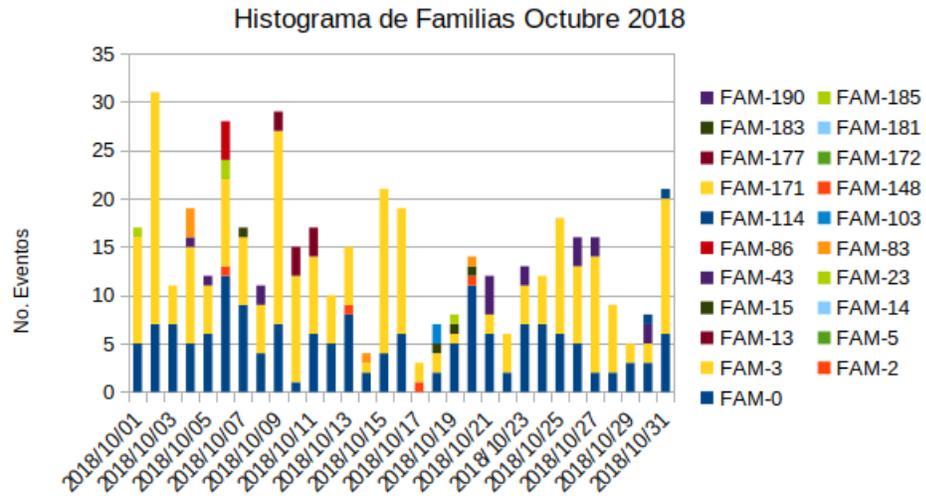


Figura 5.9. Histograma de Familias creadas con REDPy. Octubre 2018. A la derecha se observa la clasificación en colores dada para cada una de las familias. *Fuente: Elaboración propia*

Las familias más representativas del mes de octubre son, según el histograma de la figura 5.6: FAM-0, FAM-3.

5.2.5. Resultados de Noviembre 2018

El histograma de familias de eventos detectadas por REDPy [1] para el mes de Julio se presenta en la figura 5.10.

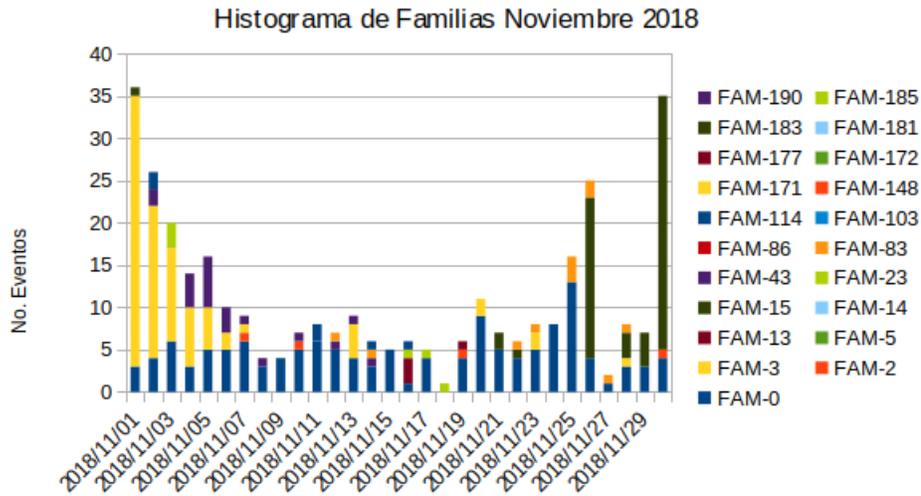


Figura 5.10. Histograma de Familias creadas con REDPy. Noviembre 2018. A la derecha se observa la clasificación en colores dada para cada una de las familias. *Fuente: Elaboración propia*

Las familias más representativas del mes de noviembre son, según el histograma de la figura 5.10: FAM-0, FAM-3.

5.2.6. Resultados de Diciembre 2018

El histograma de familias de eventos detectadas por REDPy [1] para el mes de Diciembre se presenta en la figura 5.11.

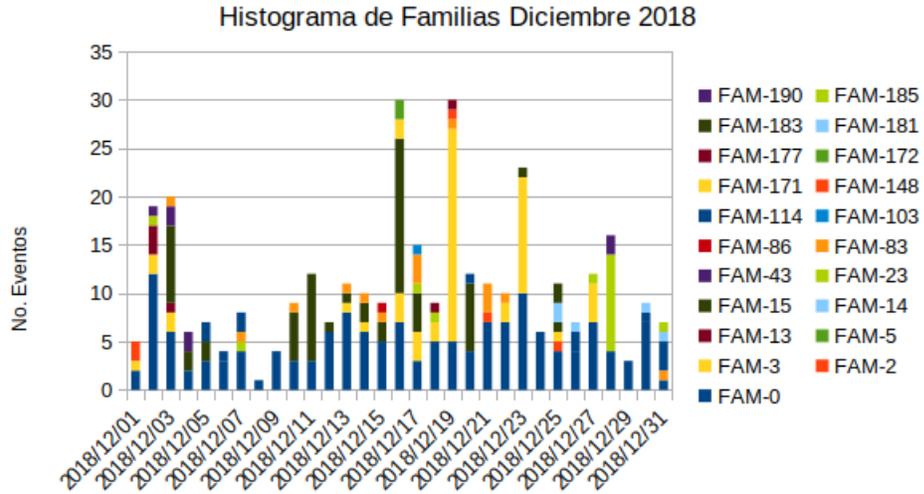


Figura 5.11. Histograma de Familias creadas con REDPy. Diciembre 2018. A la derecha se observa la clasificación en colores dada para cada una de las familias. *Fuente: Elaboración propia*

Las familias más representativas del mes de diciembre son, según el histograma de la figura 5.11: FAM-0, FAM-3.

Analizando los histogramas de eventos de cada mes se puede decir que las familias más representativas de la actividad en el período analizado son: **FAM-0**, **FAM-2**, **FAM-3**, **FAM-5**. A continuación se detallan cada una de estas familias.

5.2.7. Familia 0

Las características de la familia 0 puede verse en la tabla 5.4, el nombre de familia 0 es dado por el programa REDPy [1].

Tabla 5.4. Características de la Familia 0

| Parámetro | Valor |
|---------------------------|-------------|
| No. de Eventos | 909 |
| Duración de la familia | 180.59 días |
| Media entre cada evento | 4.77 horas |
| Mediana entre cada evento | 3.25 horas |

El espectro de Fourier se observa en la figura 5.12:

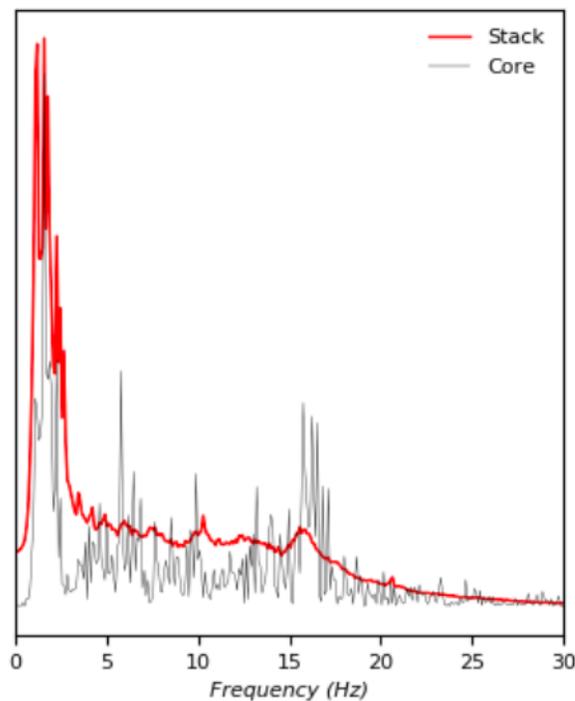
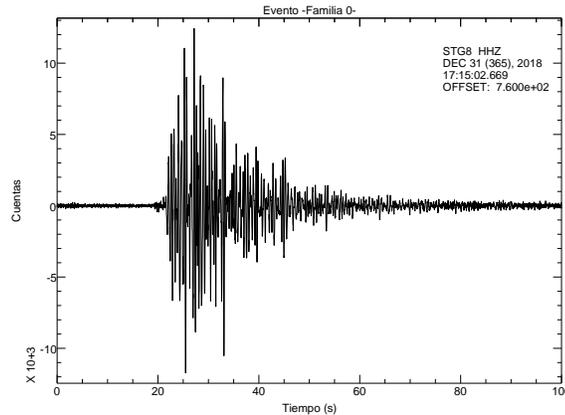


Figura 5.12. Espectro de Fourier, familia 0. La línea gris representa el el espectro del evento representativo de la familia llamado “core”. La línea roja representa la superposición de los espectros de Fourier de todos lo eventos de la familia. La frecuencia pico de esta familia esta entre 0 y 4 Hz *Fuente: Resultado de REDPy*

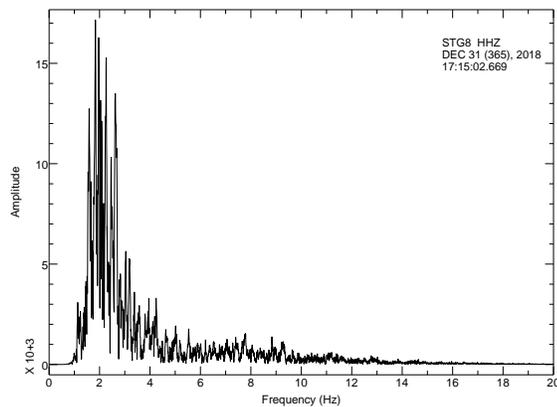
De los 909 eventos que contiene esta familia se presentan a continuación 3 eventos y su respectivo espectro de Fourier.

Eventos de la familia 0:

Primer ejemplo de evento sísmico volcánico perteneciente a la familia 0, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.13



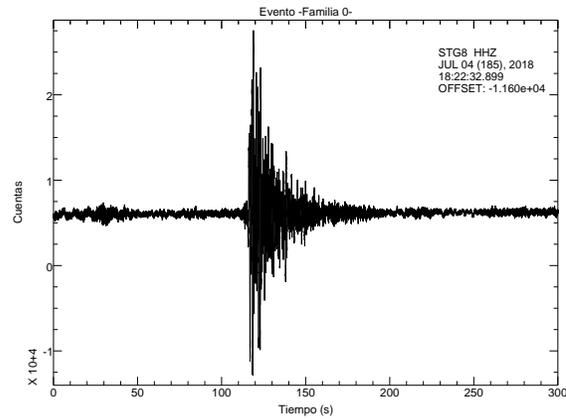
(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 0. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



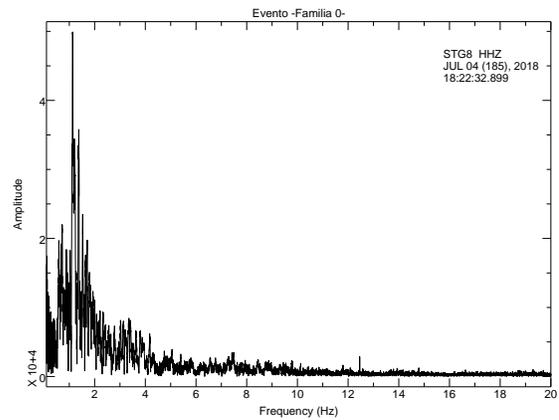
(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 0. Este evento tiene una frecuencia pico entre 1-4 Hz

Figura 5.13. En la imagen con inciso (a) se muestra la forma de onda del evento, esta tiene un comportamiento primario muy impulsivo. En la figura con inciso (b) se aprecia que las frecuencias pico están entre 1-4 Hz esto implica una mayor energía. *Fuente: Elaborado con SAC [8]*

Segundo ejemplo de evento sismo volcánico perteneciente a la familia 0, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.14



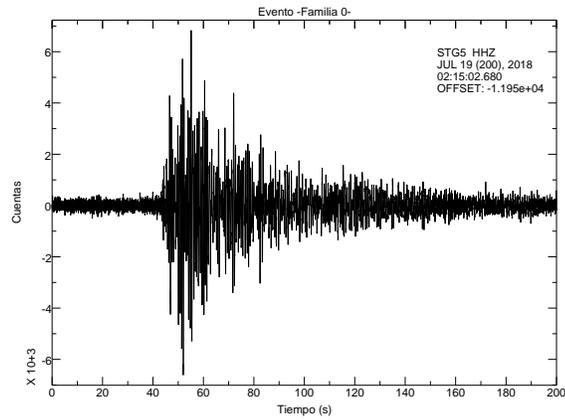
(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 0. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



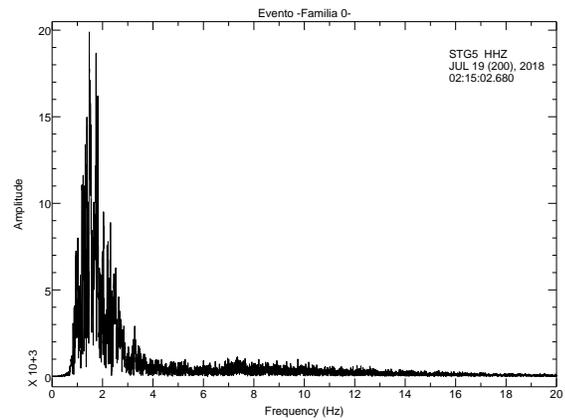
(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 0

Figura 5.14. En la imagen con inciso (a) se muestra la forma de onda del evento, esta tiene un comportamiento primario muy impulsivo. En la figura con inciso (b) se observa que su frecuencias pico están entre 1-4 Hz esto implica una mayor energía. *Fuente: Elaborado con SAC [8]*

Tercer ejemplo de evento sismo volcánico perteneciente a la familia 0, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.15



(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 0. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 0

Figura 5.15. En la imagen con inciso (a) se muestra la forma de onda del evento, esta tiene un comportamiento primario muy impulsivo. En la figura con inciso (b) se observan las bajas frecuencias que tiene este evento. *Fuente: Elaborado con SAC [8]*

5.2.8. Familia 2

Las características de la familia 2 puede verse en la tabla 5.5, el nombre de familia 2 es dado por el programa REDPy [1].

Tabla 5.5. Características de la Familia 2

| Parámetro | Valor |
|---------------------------|-------------|
| No. de Eventos | 91 |
| Duración de la familia | 172.92 días |
| Media entre cada evento | 46.11 horas |
| Mediana entre cada evento | 6.70 horas |

El espectro de Fourier que representa la familia 2 puede verse en la figura 5.16.

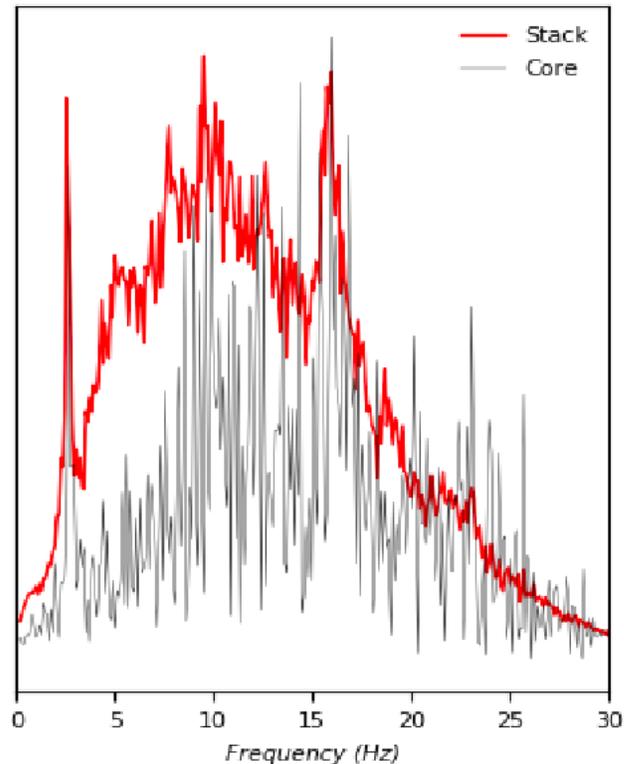
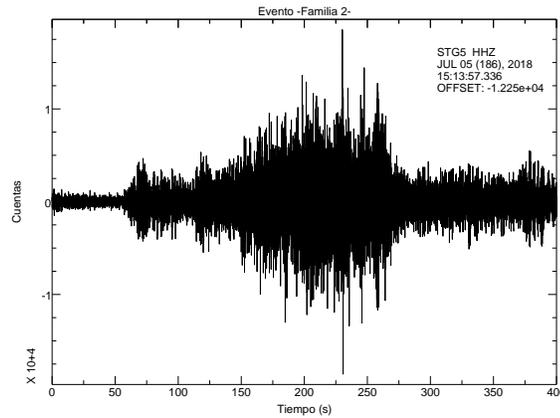


Figura 5.16. Espectro de Fourier, familia 2. La línea gris representa el el espectro del evento representativo de la familia llamado “core”. La línea roja representa la superposición de los espectros de Fourier de los eventos de la familia en todas las estaciones. *Fuente: Resultado de REDPy*

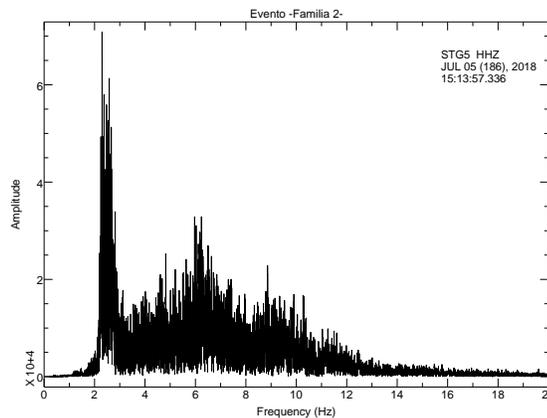
De los 91 eventos que contiene esta familia se presentan a continuación 3 eventos y su respectivo espectro de Fourier.

Eventos de la familia 2:

Primer ejemplo de evento sismo volcánico perteneciente a la familia 2, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.17



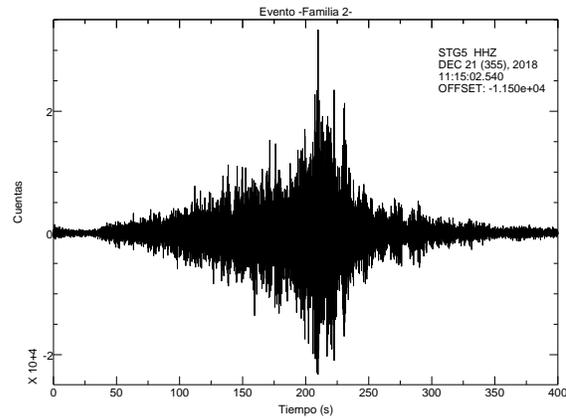
(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 2. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



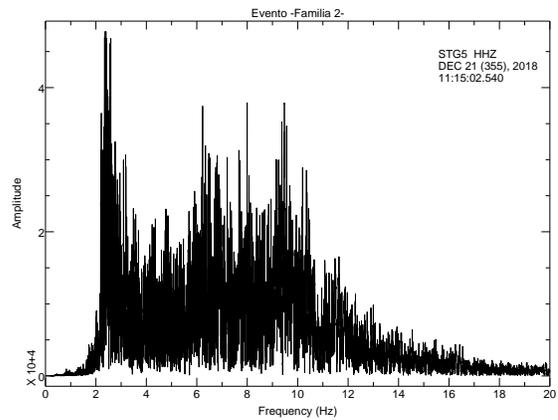
(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 2

Figura 5.17. En la imagen con inciso(a) puede observarse un inicio y final emergente en la función de onda. En la imagen con inciso (b) puede observarse su espectro de frecuencias, este presenta amplitudes grandes entre 2 y 10 Hz . *Fuente: Elaborado con SAC [8]*

Segundo ejemplo de evento sismo volcánico perteneciente a la familia 2, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.18



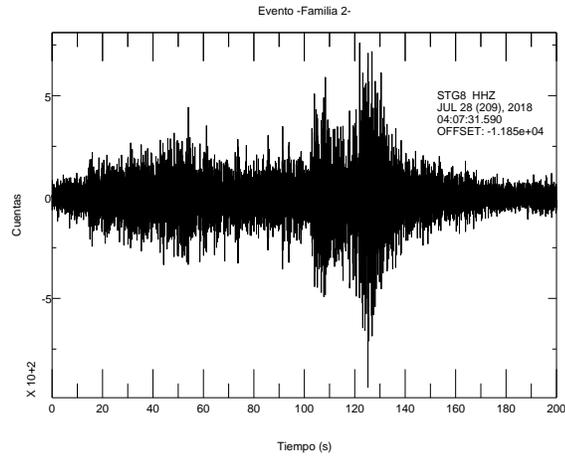
(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 2. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



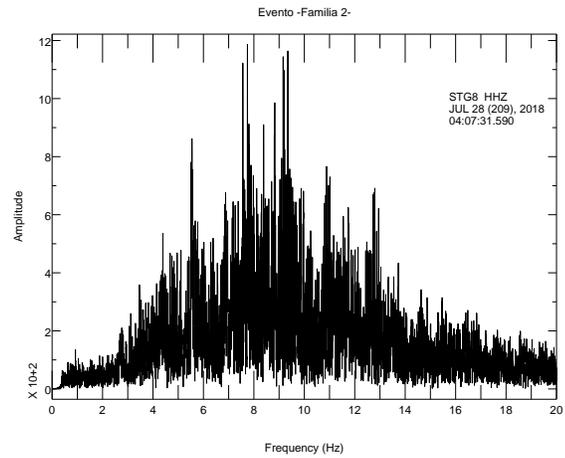
(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 2

Figura 5.18. En la imagen con inciso (a) puede observarse un inicio y final emergente en la función de onda del evento sismo volcánico. En la imagen con inciso (b) puede observarse su espectro de frecuencias, este presenta amplitudes grandes entre 2 y 12 Hz . *Fuente: Elaborado con SAC [8]*

Tercer ejemplo de evento sismo volcánico perteneciente a la familia 2, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.19



(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 2. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 2

Figura 5.19. En la imagen con inciso (a) puede observarse un inicio y final emergente en la función de onda del evento sísmo volcánico. En la imagen con inciso (b) puede observarse su espectro de frecuencias, este presenta amplitudes grandes entre 4 y 12 Hz .

Fuente: Elaborado con SAC [8]

5.2.9. Familia 3

Las características de la familia 3 puede verse en la tabla 5.6, el nombre de familia 3 es dado por el programa REDPy [1].

Tabla 5.6. Características de la Familia 3

| Parámetro | Valor |
|---------------------------|-------------|
| No. de Eventos | 640 |
| Duración de la familia | 174.54 días |
| Media entre cada evento | 6.56 horas |
| Mediana entre cada evento | 0.30 horas |

El espectro de Fourier que representa la familia 3 puede verse en la figura 5.20.

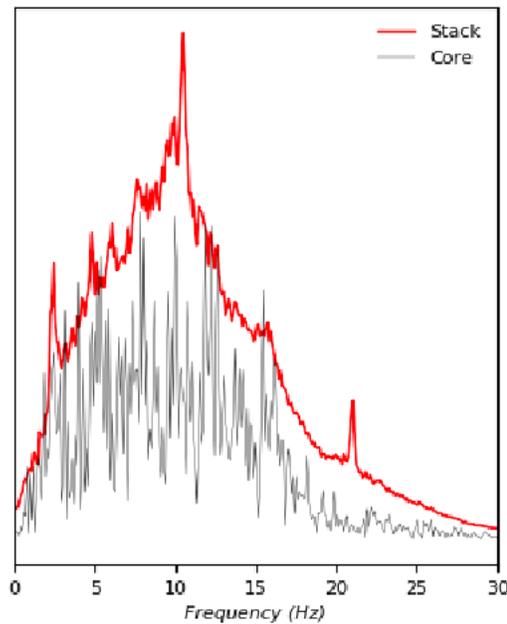


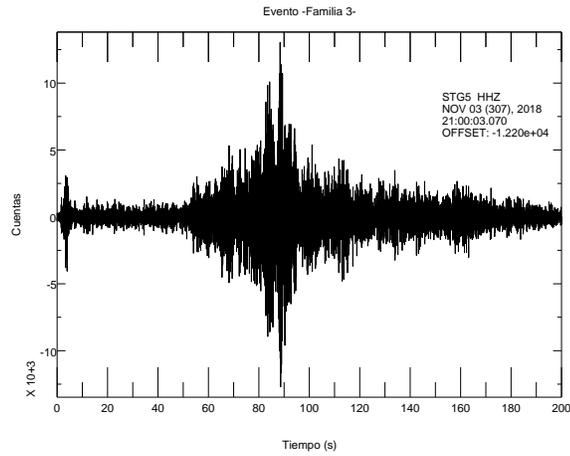
Figura 5.20. Espectro de Fourier, familia 3. La línea gris representa el el espectro del evento representativo de la familia llamado “core”. La línea roja representa la superposición de los espectros de Fourier de los eventos de la familia en todas las estaciones. *Fuente: Resultado de REDPy*

De los 640 eventos que contiene esta familia se presentan a continuación 3 eventos y su respectivo espectro de Fourier.

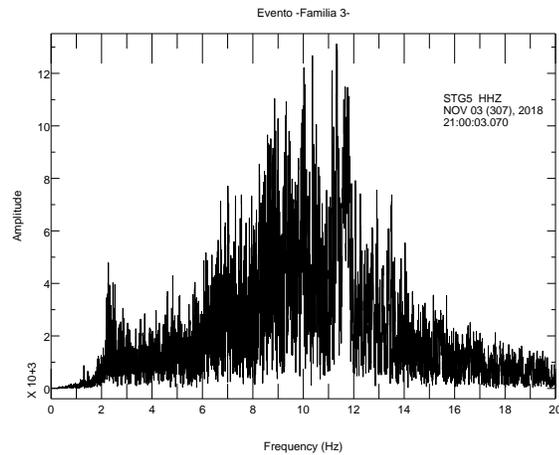
Eventos de la familia 3:

Primer ejemplo de evento sismo volcánico perteneciente a la familia 3, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en

la figura 5.21



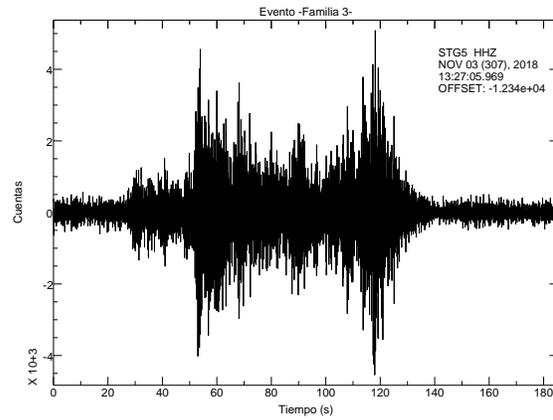
(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 3. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



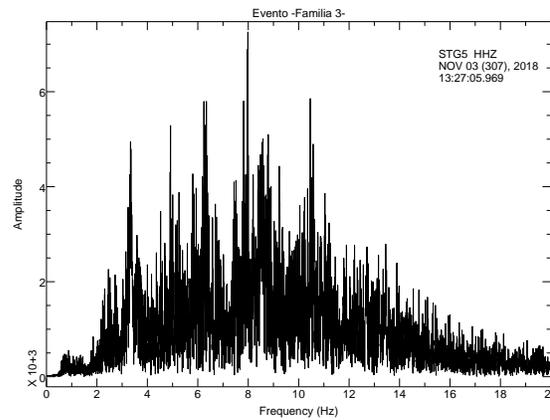
(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 3

Figura 5.21. En la imagen con inciso (a) puede observarse un inicio y final emergente en la función de onda. En la imagen con inciso (b) puede observarse su espectro de frecuencias, este presenta amplitudes grandes entre 2 y 14 Hz . Fuente: *Elaborado con SAC [8]*

Segundo ejemplo de evento sísmico volcánico perteneciente a la familia 3, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.22



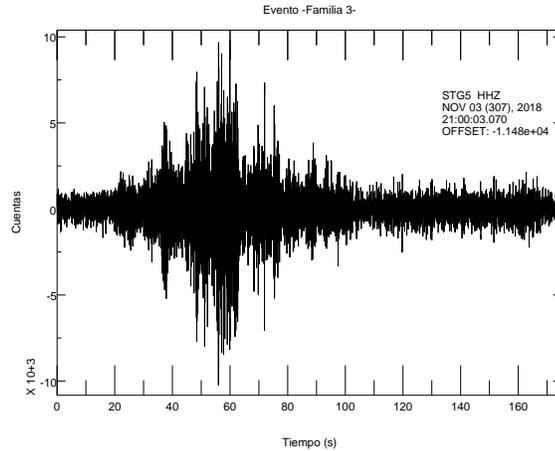
(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 3. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



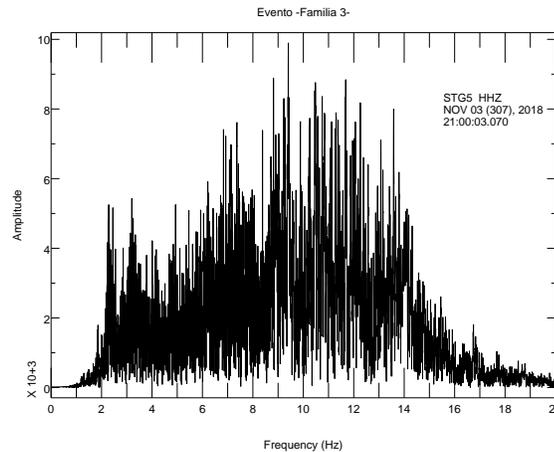
(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 3

Figura 5.22. En la imagen con inciso (a) puede observarse en la función de onda un inicio impulsivo, se desvanece un poco y presenta nuevamente otra parte impulsiva. En la imagen con inciso (b) puede observarse su espectro de frecuencias, este presenta amplitudes grandes entre 2 y 14 Hz . Fuente: Elaborado con SAC [8]

Tercer ejemplo de evento sismo volcánico perteneciente a la familia 3, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.23



(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 3. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 3

Figura 5.23. En la imagen con inciso (a) puede observarse un inicio y final emergente en la función de onda del evento sismo volcánico. En la imagen con inciso (b) puede observarse su espectro de frecuencias, este presenta amplitudes grandes entre 2 y 14 Hz . *Fuente: Elaborado con SAC [8]*

5.2.10. Familia 5

Las características de la familia 5 puede verse en la tabla 5.7, el nombre de familia 5 es dado por el programa REDPy [1].

Tabla 5.7. Características de la Familia 5

| Parámetro | Valor |
|---------------------------|------------|
| No. de Eventos | 659 |
| Duración de la familia | 77.33 días |
| Media entre cada evento | 2.82 horas |
| Mediana entre cada evento | 0.19 horas |
| Evento de mínima duración | |

El espectro de Fourier que representa la familia 5 puede verse en la figura 5.24.

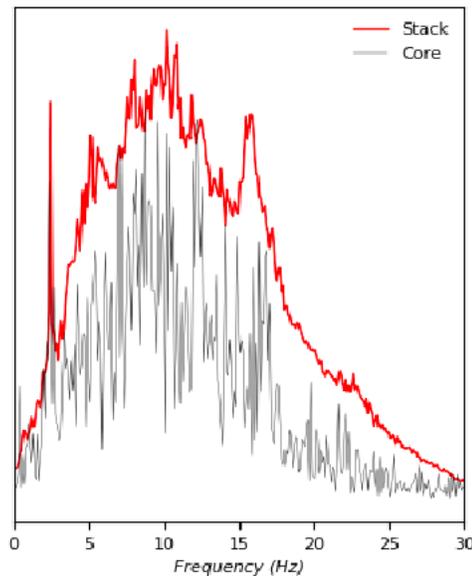
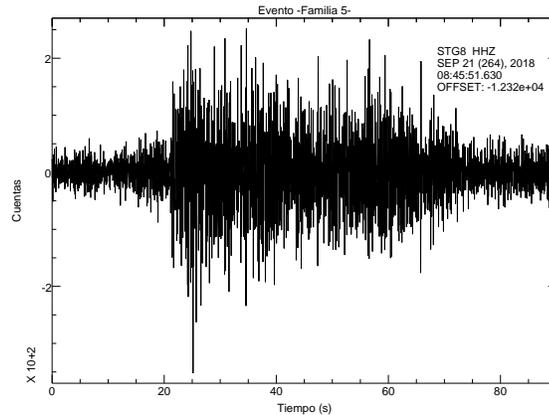


Figura 5.24. Espectro de Fourier, familia 5. La línea gris representa el el espectro del evento representativo de la familia llamado “core”. La línea roja representa la superposición de los espectros de Fourier de los eventos de la familia en todas las estaciones. *Fuente: Resultado de REDPy*

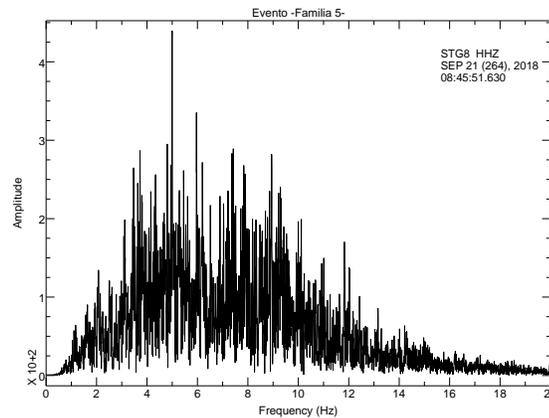
De los 659 eventos que contiene esta familia se presentan a continuación 3 eventos y su respectivo espectro de Fourier.

Eventos de la familia 5:

Primer ejemplo de evento sísmico volcánico perteneciente a la familia 5, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.25



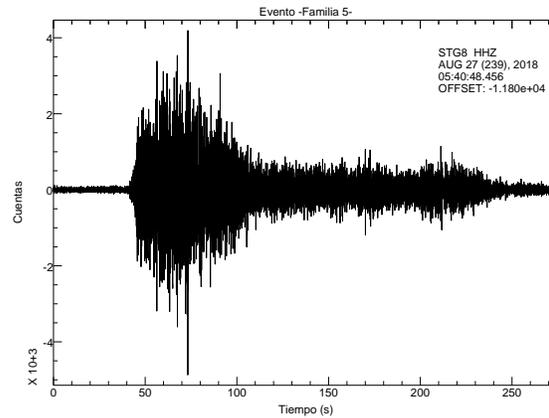
(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 5. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



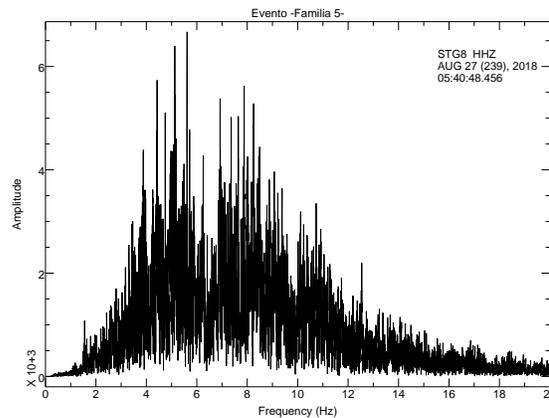
(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 5

Figura 5.25. En la imagen con inciso (a) puede observarse la función de onda del evento sísmico volcánico un inicio impulsivo y final que va desvaneciéndose de forma lenta. En la imagen con inciso (b) puede observarse su espectro de frecuencias, este presenta amplitudes grandes entre 2 y 10 Hz . Fuente: *Elaborado con SAC [8]*

Segundo ejemplo de evento sísmo volcánico perteneciente a la familia 5, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.26



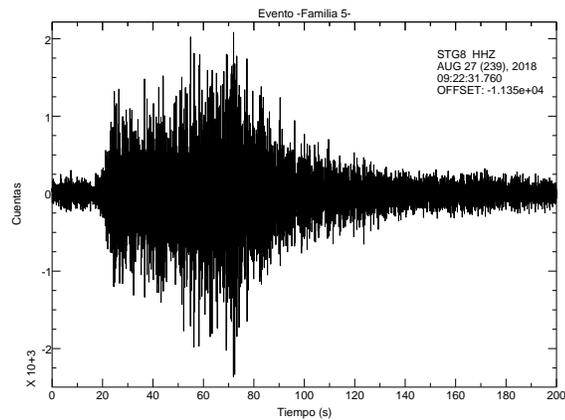
(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 5. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



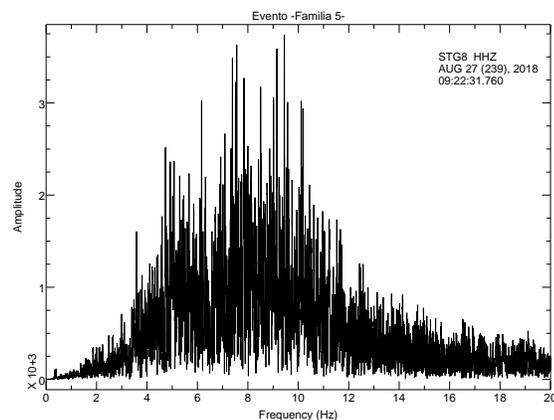
(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 5

Figura 5.26. En la imagen con inciso (a) puede observarse la función de onda del evento sísmo volcánico un inicio impulsivo y final que va desvaneciéndose, manteniéndose por un momento constante en amplitud. En la imagen con inciso (b) puede observarse su espectro de frecuencias, este presenta amplitudes grandes entre 2 y 12 Hz . Fuente: Elaborado con SAC [8]

Tercer ejemplo de evento sismo volcánico perteneciente a la familia 5, detectado de manera automática. Este se muestra con su respectivo espectro de frecuencias en la figura 5.27



(a) Evento detectado automáticamente perteneciente a la familia 5. La señal tiene un filtro pasa banda de 1-20 Hz



(b) Espectro de Fourier del evento de la familia 5

Figura 5.27. En la imagen con inciso (a) puede observarse la función de onda del evento sismo volcánico un inicio impulsivo y final que va desvaneciéndose de forma lenta. En la imagen con inciso (b) puede observarse su espectro de frecuencias, este presenta amplitudes grandes entre 2 y 12 Hz . Fuente: *Elaborado con SAC [8]*

5.3. Discusión de Resultados

5.3.1. Algoritmo STA/LTA

Para poder validar los resultados obtenidos al implementar el algoritmo STA/LTA que se probaron muchas configuraciones diferentes de STA / LTA, para optimizar la detección de eventos que se consideraban "buenos eventos", la configuración elegida fue la que detectaba la mayoría de eventos sísmicos. El porcentaje de acierto de estos "buenos eventos" supera el 85 % de detección en el período seleccionado. El ajuste que se hizo al buscar estos parámetros fue tal que, no importa si son eventos con amplitudes en cuentas grandes o pequeñas, ni el orden de las mismas. Como puede observarse en los resultados dados en la figura: 5.1 y 5.4. La duración de los eventos sismo volcánicos no representa tampoco un problema en la implementación del algoritmo STA/LTA [10], ejemplificando esto se puede observa la figura 5.2 si compara con los demás resultados.

Se escribe "buenos eventos" porque esta parte de detección de eventos sirvió para poder relacionar estos "buenos eventos" a eventos volcánicos del complejo Santiaguito.

5.3.2. REDPy

Parte de poder validar los resultados obtenidos en la implementación de REDPy [1] es contrastándolos con estudios que utilizan técnicas diferentes donde se caracteriza la actividad del complejo volcánico Santiaguito o la actividad de un volcán en general.

5.3.2.1. Familias de REDPy asociadas a eventos volcánicos

Las familias obtenidas en los resultados de la implementación de REDPy [1] pueden ser relacionadas con un evento volcánico particular, en la tabla 5.8 se muestra la clasificación de dichos eventos. Esto se hizo comparando las familias obtenidas con la clasificación en [23] y [15].

Tabla 5.8. Eventos sismo volcánicos que se asocian a las familias encontradas con REDPy

| Eventos | Familias |
|------------------------------------|-----------------|
| Explosiones | FAM-0 |
| Explosiones con flujo piroclástico | FAM-5 |
| Avalanchas | FAM-2, FAM-3 |

El total de eventos que tiene cada una de las categorías de eventos volcánicos se presenta en la tabla 5.9

Tabla 5.9. Familias de eventos sísmicos creadas con REDPy que se asocian a un evento volcánico

| Familia | No. de eventos |
|------------------------------------|-----------------------|
| Explosiones | 909 |
| Explosiones con flujo piroclástico | 659 |
| Avalanchas | 731 |

La selección de las familias que se presentaron en la sección de resultados están ya depuradas. Las familias que no fueron seleccionadas contenían eventos sísmicos que no se pudieron asociar a un evento volcánico, o que REDPy[1] no detectaba de manera correcta. Esta depuración se realizó analizando las formas de onda en Swarm [7].

Se muestran detalles para cada una de las familias de eventos volcánicos.

Explosiones: Se detectaron 909 señales asociadas a explosiones del volcán Santiaguito, en la imágenes 5.14, 5.14, 5.15 se muestran algunos ejemplos de estas señales sísmicas y su respectivo espectrograma.

Explosiones con flujo piroclástico: Se detectaron 659 señales asociadas a explosiones del volcán Santiaguito, en la imágenes 5.25 , 5.26, 5.27 se muestran las señales sísmicas y su respectivo espectrograma.

Avalanchas: Se detectaron 731 señales asociadas a explosiones del volcán Santiaguito, en la imágenes 5.17, 5.18, 5.19, 5.21, 5.22 y 5.23 se muestran las señales sísmicas y su respectivo espectrograma.

Las familias a las que se les asocia un evento volcánico son las más numerosas en eventos, estos eventos cumplen con las características que se indican en el marco

teórico y dado que se comparó con un artículo actual (Febrero 2019) [23] le da mayor solidez a este estudio.

Al implementar REDPy hay que notar en los resultados de los eventos de las familias que no todos se detectan en la que fue la estación de referencia en el algoritmo STA/LTA, los eventos eran en muchas ocasiones localizados en STG5 de manera correcta.

El complejo volcánico Santiaguito como todos los volcanes del mundo tienen muchas variables que no se pueden controlar, esto no da un límite al número de eventos a detectar, se configuraron los parámetros de REDPy que funcionaran para la mayor parte de los eventos que presenta dicho complejo volcánico.

5.3.2.2. Comparación con lo boletines vulcanológicos del personal de INSIVUMEH

Los boletines realizados por el personal de vulcanología se pueden encontrar en [24]. Se revisó la actividad que tuvo el complejo Santiaguito en el período analizado. Se presentan algunos ejemplos donde se compararon dichos boletines con los resultados obtenidos con REDPy [1]:

La información siguiente pertenece al boletín de 6 julio de 2018:

Tabla 5.10. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 1

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|--|------------------------------|
| Ocasionalmente se observa desgasificación de color blanca a una altura aproximada de 2900 msnm (9514 pies) dispersándose en dirección suroeste. Se observan explosiones débiles y moderadas generando una columna de color blanco a una altura aproximada de 3100 msnm (10171 pies) desplazándose hacia el suroeste, caída de ceniza en el perímetro volcánico. Avalanchas débiles y moderadas en el flanco sureste. | 7 Explosiones y 4 Avalanchas |

Como se observa en la parte del boletín de la tabla 5.10 hay explosiones débiles y moderadas así como avalanchas, en REDPy se detectaron 7 explosiones y 4 avalanchas. Hay que tomar en no todas las estaciones ven las avalanchas porque pueden ser en diferentes flancos del volcán. Con la caída de ceniza esta puede relacionarse con las explosiones detectadas por REDPy.

La información siguiente pertenece al boletín de 23 julio de 2018:

Tabla 5.11. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 2

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|---|---|
| <p>Desgasificación de color blanca a una altura aproximada de 2900 msnm (9514 pies) dispersándose en dirección suroeste. Se observan explosiones débiles y moderadas generando una columna de color blanco a una altura aproximada de 3200 msnm (10498 pies) desplazándose hacia el sureste, caída de ceniza en el perímetro volcánico. Avalanchas débiles y moderadas en el flanco suroeste, leve caída de ceniza en las cercanías del perímetro volcánico. Avalanchas débiles y moderadas en la cúpula sureste.</p> | <p>5 Explosiones, 3 Avalanchas 11 Explosiones con flujo piroclástico.</p> |

En la tabla 5.11 notamos como coinciden lo reportado por los observadores del volcán y REDPy. Se reportan explosiones débiles y moderadas, también avalanchas y caída de ceniza. En la clasificación de familias, se encontró una, que son explosiones con flujo piroclástico puede estar relacionada también a la caída de ceniza, tomando en cuenta que REDPy detecto varios de estos eventos en el día.

La información siguiente pertenece al boletín de 27 julio de 2018:

Tabla 5.12. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 3

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|---|--|
| <p>Desgasificación de color blanca a una altura aproximada de 2900 msnm (9514 pies) dispersa en dirección suroeste. Se observan explosiones débiles y moderadas generando una columna de color blanco a una altura aproximada de 3200 msnm (10498 pies) desplazándose hacia el suroeste. Avalanchas débiles y moderadas en la cúpula sureste.</p> | <p>8 Explosiones, 5 Avalanchas 2 Explosiones con flujo piroclástico.</p> |

La coincidencia de eventos que se observa en la tabla 5.12 son en explosiones y avalanchas que presenta el volcán. No se reporta caída de ceniza que se pueda relacionar con las explosiones con flujo piroclástico detectadas por REDPy.

La información siguiente pertenece al boletín de 9 agosto de 2018:

Tabla 5.13. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 4

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|--|---|
| <p>Desgasificación de color blanca a una altura aproximada de 2,850 msnm (10,498 pies) dispersa en dirección suroeste. Se observan explosiones débiles y moderadas generando una columna de color blanco a una altura aproximada de 3,200 msnm (10,498 pies) desplazándose hacia el suroeste. Constantes avalanchas débiles en la cúpula sureste</p> | <p>4 Explosiones, 4 Avalanchas, 9 Explosiones con flujo piroclástico.</p> |

La coincidencia de eventos que se observa en la tabla 5.13 son en explosiones

y avalanchas que presenta el volcán. No se encuentra una relación para lo las explosiones con flujo piroclástico y lo reportado por los observadores.

La información siguiente pertenece al boletín de 25 agosto de 2018:

Tabla 5.14. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 5

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|--|---|
| <p>La estación la estación sísmica STG3 registra explosiones débiles y moderadas, el domo caliente se observa expulsando columnas de ceniza gris a 3000 msnm. con dispersión oeste, Constantes avalanchas débiles en el flancos oeste.</p> | <p>5 Explosiones, 8 Avalanchas 24 Explosiones con flujo piroclástico.</p> |

La tabla 5.14 muestra que el volcán tuvo explosiones, avalanchas y expulsión de ceniza, lo que detecto REDPy es: Explosiones, Avalanchas y Explosiones con flujo piroclástico. Las columnas de ceniza gris reportada por los observadores del volcán podría relacionarse con las explosiones detectadas. Una cosa a notar es que el boletín está basado en lo que reportó la estación STG3, la cuál no fue incluida en el análisis. Esto significa que STG3 detectó una actividad muy similar a alguna de las estaciones STG2, STG5, STG8 usadas en este estudio.

La información siguiente pertenece al boletín de 12 septiembre de 2018:

Tabla 5.15. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 6

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|--|--------------------------------------|
| <p>Desgasificación de color blanca a 2900 msnm que se dispersa al oeste, las estaciones sísmicas registran 11 explosiones débiles y algunas moderadas en horas de la noche y madrugada que elevan columnas de ceniza de color gris claro a 2800 - 3200 msnm (9185-10500 pies) con una dispersión hacia el oeste y suroeste, se genera caída de finas partículas de ceniza en el perímetro volcánico, constantes avalanchas débiles y moderadas en los flancos sureste y noreste.</p> | <p>19 Explosiones, 5 Avalanchas.</p> |

La coincidencia de eventos que se observa en la tabla 5.15 son en explosiones la cual da un dato bastante cercano y avalanchas que presenta el volcán. La caída de ceniza en el perímetro volcánico puede relacionarse con las explosiones detectadas en REDPy.

La información siguiente pertenece al boletín de 17 septiembre de 2018:

Tabla 5.16. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 7

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|--|---|
| <p>Fumarola de desgasificación blanca a una altura aproximada de 2,900 msnm (9,514 pies) dispersa en dirección suroeste. Se registran explosiones débiles generando columna de ceniza a una altura aproximada de 3,200 msnm (10,498 pies) desplazándose al suroeste. Leve caída de ceniza en el perímetro volcánico.</p> | <p>5 Explosiones y 34 Explosiones con flujo piroclástico.</p> |

El boletín reporta explosiones generando columna de ceniza y leve caída de ceniza en el perímetro volcánico. REDPy detecto explosiones y explosiones con flujo piroclástico, ambas pueden relacionarse con la caída de ceniza en el perímetro volcánico. No se reportan avalanchas en ninguno de los dos.

La información siguiente pertenece al boletín de 10 de octubre de 2018:

Tabla 5.17. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 8

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|---|--------------------------------------|
| <p>Desgasificación de color blanca a 3000 msnm que se dispersa al noroeste, las estaciones sísmicas registran 9 explosiones débiles en las últimas 24 horas que elevan columnas de ceniza de color blanca a 3000 - 3300 msnm (9840-10825 pies) con una dispersión hacia el noroeste, avalanchas débiles y moderadas en los flancos sureste y noreste.</p> | <p>7 Explosiones, 19 Avalanchas.</p> |

En la tabla 5.17 puede observarse que el boletín reporta 9 explosiones en las últimas 24 horas y REDPy detecta 7, lo cual es bastante cercano. También se coinciden en las avalanchas detectadas.

La información siguiente pertenece al boletín de 26 de noviembre de 2018:

Tabla 5.18. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 9

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|---|------------------------|
| <p>El cráter del domo Caliente mantiene fumarola blanca y explosiones en su mayoría débiles, con columnas de ceniza gris a 3,200 msnm (10,498 pies). Que se desplazan al oeste. Constantes avalanchas e bloques desde la cúpula del cráter sobre el flanco sureste. La estación sísmica STG3 registra las explosiones y avalanchas.</p> | <p>13 Explosiones.</p> |

En la tabla 5.18 se puede observar como se coincide en los eventos de explosiones que tiene el volcán, que también los detecta REDPy. Las avalanchas no coinciden y esto puede deberse a que la estación que se utilizó para realizar el boletín fue STG3 y las usadas en este estudio son: STG2, STG5, STG8.

La información siguiente pertenece al boletín de 24 de diciembre de 2018:

Tabla 5.19. Comparación de los resultados con los boletines vulcanológicos. Ejemplo 10

| Información de la Actividad dada por el Boletín | Resultado REDPy |
|---|--------------------------------------|
| <p>Fumarola de desgasificación a una altura aproximada de 3,000 msnm (9,842 pies) dispersa en dirección suroeste. Durante la noche y madrugada se registran explosiones débiles generando columna de ceniza a una altura aproximada de 3,100 msnm (10,171 pies) desplazándose al suroeste, caída de ceniza en zonas montañosas. Avalanchas débiles y moderadas desde la cúpula este y suroeste.</p> | <p>9 Explosiones y 12 Avalanchas</p> |

En la tabla 5.19 se observa la coincidencia entre explosiones y avalanchas que reporta el boletín diario con lo detectado por REDPy.

CONCLUSIONES

1. Los parámetros encontrados para la implementación del algoritmo STA/LTA en la actividad del volcán Santiaguito son:

$$STA = 12s, \quad LTA = 40s, \quad Trigger_{On} = 2.20, \quad Trigger_{Off} = 0.39,$$

usando estos parámetros en el catálogo de eventos, para evaluar los parámetros se lograron detectar aproximadamente 442 eventos de 499, esto significa un porcentaje cerca del 88% de eventos sísmicos.

2. Con los parámetros encontrados de STA, LTA, Trigger On, Trigger Off, se modificó el archivo de configuración del programa REDPy, para reconocer eventos de manera automática. Los resultados al implementar REDPy son de: 21 familias de eventos, detectando 2636 eventos en el periodo del 4 de julio de 2018 al 31 de diciembre de 2018.

3. Los eventos volcánicos detectados de manera automática fueron:

909 Explosiones, 659 Explosiones con flujo piroclástico, 731 Avalanchas,

Las frecuencias características en su espectro de Fourier de cada uno de los eventos volcánicos son:

Entre 1 – 4Hz para las Explosiones, entre 2 – 12Hz para las Explosiones con flujo piroclástico y entre 2 – 14Hz para las Avalanchas.

4. Contrastando con los boletines vulcanológicos realizados por el personal del INSIVUMEH del departamento de Geofísica en las fechas analizados se verificó que:

Los resultados obtenidos con REDPy [1] tienen un buen margen de coincidencia, que se puede observar en la tablas 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.17,

5.18, 5.19. Esto se hizo de manera cualitativa debido a que los boletines tradicionalmente se realizan con información proporcionada por los observadores y no de forma instrumental.

RECOMENDACIONES

1. Implementar otros algoritmos de detección automática de eventos sísmicos en el volcán Santiaguito y compararlos para determinar cuáles son más eficaces para la actividad del complejo volcánico Santiaguito.
2. Implementar el algoritmo STA/LTA en una data de mayor volumen para poder verificar si se pueden mejorar los parámetros y probar estos nuevos parámetros en un periodo mayor en REDPy.
3. Usando nuevos valores de STA/LTA configurar el programa REDPy con más de una estación sísmica para que se declare un evento como repetido.
4. Estudiar las familias que fueron depuradas en este estudio, ya que existen familias numerosas que no fueron tomadas en cuenta debido a que sus eventos tenían amplitudes muy pequeñas ocasionando conflicto con el ruido de fondo las estaciones sísmicas.
5. Mantener en operación, densificar y diversificar las redes de instrumentación de vigilancia volcánica en el Volcán Santiaguito.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hotovec-Ellis, A.J., and Jeffries, C., 2016. Near Real-time Detection, Clustering, and Analysis of Repeating Earthquakes: Application to Mount St. Helens and Redoubt Volcanoes – Invited, presented at Seismological Society of America Annual Meeting, Reno, Nevada, 20 Apr.
- [2] Hotovec-Ellis, A.J., and Jeffries, C..REDPy (Repeating Earthquake Detector in Python) *REDPy* [En línea] [Consultado el 23 de septiembre de 2018] <https://github.com/ahotovec/REDPy>
- [3] INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA. *INSIVUMEH* [En línea] [Consultado el 10 de junio de 2019]. Disponible en: http://www.insivumeh.gob.gt/LAIPDF/Articulo%2010/inciso%205/Mision_Vision.pdf
- [4] INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGÍA, VULCANOLOGÍA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA. *INSIVUMEH*, Unidad de Vulcanología, Volcán Santiaguito [Folleto].
- [5] Aragón, Magda (2013). Cuando el día se volvió noche. Revista Estudios Digital (Escuela de Historia USAC).
- [6] Departamento de Investigación y Estudios Geológicos [DIEG] del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (s. f.). Los Volcanes [Folleto]. Guatemala.
- [7] USGS, Software developed by the USGS Volcano Science Center. *USGS* [En línea] [Consultado el 17 de julio de 2019]. Disponible en: <https://volcanoes.usgs.gov/software/swarm>
- [8] Goldstein, P., A. Snoke, (2005), “SAC Availability for the IRIS Community”, Incorporated Institutions for Seismology Data Management Center Electronic Newsletter.

- [9] Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo, Lee Minner (2003) “SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to “The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology”, Edited by WHK Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.
- [10] Trnkoczy, A. (1999). Topic Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. New manual of seismological observatory practice, 2.
- [11] Christopher G. Newhall, Stephen Self, (1982). *The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism*. DOI: 10.1029/JC087iC02p01231
- [12] Chouet, B., 1996a. New methods and future trends in seismological volcano monitoring. In: Scarpa, R., Tilling, R. (Eds.), Monitoring and mitigation of volcanohazards. Springer-Verlag, pp. 23–97.
- [13] Encyclopedia Britannica Academic Edition. [En línea] [Consultado el 18 de julio de 2019.] <https://www.britannica.com/science/pyroclastic-flow>
- [14] Vallance, James W. *Lahars* (2001). Sigursson, Haraldur, ed. Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press.
- [15] Zobin, Vyacheslav. (2012) “Introduction to Volcanic Seismology” Second Edition, Observatorio Vulcanológico, Universidad de Colima, Colima, Col., México
- [16] Wassermann, Joachim. (2012) “Volcano Seismology”, Chapter 13, New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2).
- [17] Incorporated Research Institutions for Seismology. IRIS, miniSEED. [En línea] [Revisado el 30 de julio de 2019]
- [18] Roca. A. *Medición de Pequeñas Perturbaciones de Velocidad Sísmica para el Volcán de Pacaya, Guatemala, Utilizando Ruido Sísmico Ambiental*. Tesis de Licenciatura, Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, USAC, Guatemala. [En línea] [Consultado el 31 de julio de 2019] <https://ecfm.usac.edu.gt/taxonomy/term/348>
- [19] Diccionario de ciencias de la tierra. (2000). Madrid: Editorial Complutense.

- [20] ObsPy. Trigger/Picker Tutorial, ObsPy Tutorial, ObsPy documentation. [En línea] [Consultado el 12 de agosto de 2019] http://docs.obspy.org/tutorial/code_snippets/trigger_tutorial.html
- [21] Brill, Kyle A. and Waite, Gregory P. and Chigna, Gustavo. (2018) *Foundations for Forecasting: Defining Baseline Seismicity at Fuego Volcano, Guatemala*. DOI: 10.3389/feart.2018.00087.
- [22] Ankerst, M., Breunig, M. M., Kriegel, H. P., and Sander, J. (1999, June). *OPTICS: ordering points to identify the clustering structure*. In *ACM Sigmod record (Vol. 28, No. 2, pp. 49-60)*. ACM.
- [23] Lamb, O., Lamur, A., Díaz-Moreno, A., De Angelis, S., Hornby, A., von Aulock, F., ... Alvarez, I. (2018). Disruption of long-term effusive-explosive activity at Santiaguito, Guatemala.
- [24] GitHub. Argueta, Peter. Tesis de Licenciatura [En línea] [Consultado el 18 de septiembre de 2018] https://github.com/PeterArgueta/Tesis_Licenciatura_en_Fisica_USAC

A. Anexos

A.1. Catálogo de eventos

El catálogo de eventos se le elaboró tomando como referencia la estación STG8, este consta con un total de 288 eventos de la actividad volcánica del complejo Santiaguito.

El archivo .csv donde de los datos de los eventos se puede encontrar en el siguiente enlace: https://github.com/PeterArgueta/Tesis_Licenciatura_en_Fisica_USAC

A.2. Resultados del algoritmo STA/LTA implementado en la actividad del volcán Santiaguito

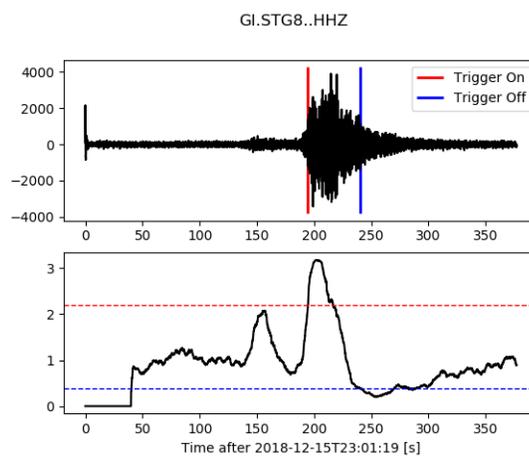


Figura A.1. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA. Fuente: Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]

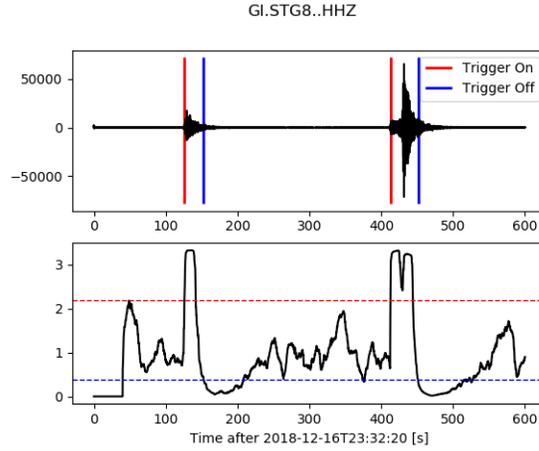


Figura A.2. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA. Fuente: Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]

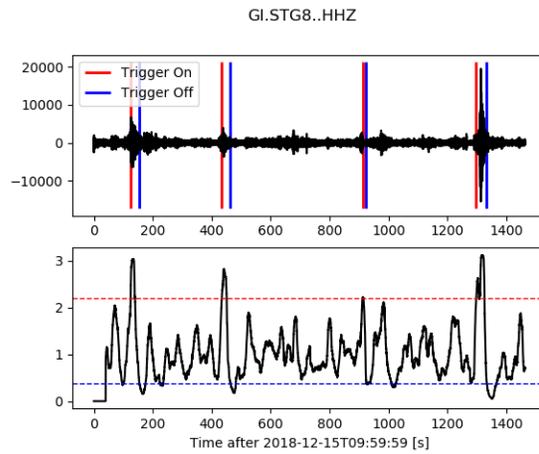


Figura A.3. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA. Fuente: Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]

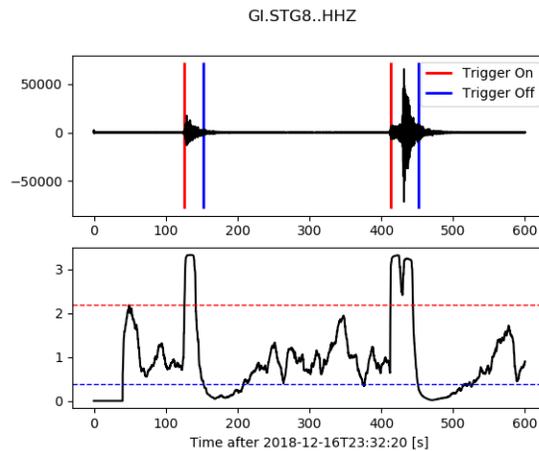


Figura A.6. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA. Fuente: Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]

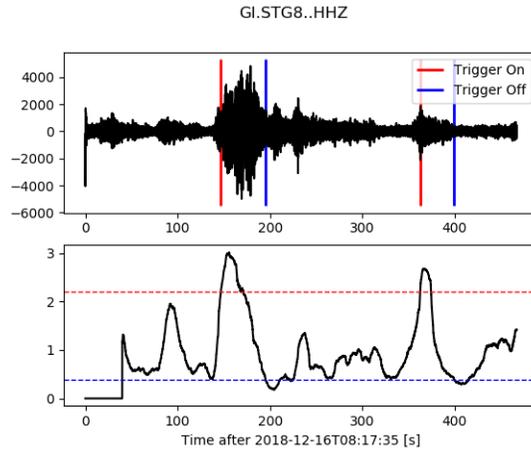


Figura A.4. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA. Fuente: Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]

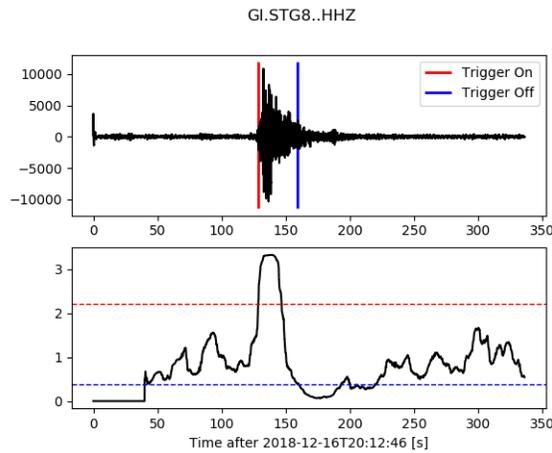


Figura A.5. Reconocimiento de señal sísmo volcánica implementando el algoritmo STA/LTA. Fuente: Elaborado con el algoritmo STA/LTA [10]

A.3. Resultados de REDPy

Más resultados de la implementación del programa REDPy pueden encontrarse en: https://github.com/PeterArgueta/Tesis_Licenciatura_en_Fisica_USAC