

Sistema Informático para el Procesamiento y Análisis de Señales Sísmicas de Volcanes en el Ecuador.

Viracucha E. *; de la Bastida J. *;

*Escuela Politécnica Nacional, Instituto Geofísico

Quito, Ecuador (e-mail: gviracucha@igepn.edu.ec; josedelabastida@hotmail.com)

Resumen: El sistema SIPASS (Sistema Informático para el Procesamiento y Análisis de Señales Sísmicas), se desarrolló en el año 2011, Surgió como una solución para reemplazar a los anteriores programas para el análisis de señales sísmicas que poseía el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), que únicamente funcionaban en computadores de más de 20 años de fabricación; con sistemas operativos obsoletos. Además, las diferentes tareas se realizaban en computadores distintos con diferentes programas informáticos, e incluso, algunas tareas requerían intervención manual. En vista de estos inconvenientes se decidió crear un sistema que le permitiera al auxiliar de sismología realizar el análisis, clasificación y procesamiento de las señales sísmicas con la utilización de un solo programa y a la vez eliminar los procesos que se ejecutaban de forma manual.

Palabras clave: Sistema informático, Procesamiento y Análisis de Señales Sísmicas, Código de Análisis Sísmico, Transformada Rápida de Fourier.

Abstract: The system SIPASS (Information System for Processing and Analysis of Seismic Signals), was developed in 2011, emerged as a solution to replace the current program for the analysis of seismic signals had the Geophysical Institute of the National Polytechnic School (IGEPN) that only computers operating in over 20 years of manufacturing, operating systems obsolete. Furthermore, different tasks were performed on different computers with different software, and even some tasks requiring manual intervention. In view of these problems it was decided to create a system that would allow the auxiliary seismology perform the analysis, classification and processing of seismic signals using a single program while eliminating the processes that are executed manually.

Keywords: Computer system, Signal Processing and Seismic Analysis, Seismic Analysis Code, Fast Fourier Transform.

1. INTRODUCCION

El Ecuador se encuentra localizado en el cinturón de fuego del Pacífico, en una zona de subducción donde convergen la placa Oceánica Nazca y la Continental Sudamericana. Este sistema de subducción es el responsable de la actividad volcánica y sísmica en el Ecuador. El arco volcánico ecuatoriano forma parte de la Zona Volcánica Norte de los Andes , que se extiende desde los 5° N (volcán Cerro Bravo, en Colombia) hasta los 2° S (volcán Sangay, en Ecuador) [4]. 5 volcanes considerados como activos, debido a que su última erupción se registró en tiempos históricos (hace 500 años), este grupo lo conforman El Cayambe, Guagua Pichincha, Chacana, Cotopaxi y Sumaco. Adicionalmente tenemos 3 volcanes en Erupción como el Reventador, Tungurahua y Sangay [1].

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), mantiene un sistema de vigilancia permanente las 24 horas al día, los 365 días del año, que le permite dar una respuesta inmediata ante una crisis sísmica o volcánicas, en el territorio ecuatoriano.

Diariamente, personal del IGEPN trabajan en el monitoreo, análisis y procesamiento de señales sísmicas, estableciendo conclusiones y posibles previsiones, con el fin de informar oportunamente sobre distintos aspectos de su estudios y sus observaciones.

1.2 Antecedentes

El IG-EPN desde sus inicios a finales de los años 80 hasta marzo del 2011, no contaba con un único programa informático que le permitiera realizar rápidamente el análisis y procesamiento de las señales sísmicas. Además, diferentes

tareas se realizaban en distintos computadores con diferentes programas informáticos, e incluso algunas tareas requerían intervención manual, como el cambio de tambor de registro. Cada tambor duraba 24 horas de registro y grabación. A la media noche de cada día estos debían ser cambiados por uno nuevo (Fig. 1).



Figura 1. Registradores, estaciones sísmicas de diferentes volcanes monitoreados, con sus tambores de registro.

Para la obtención de un nuevo tambor de registro, se realizaba el proceso de ahumado (Fig. 2), con la ayuda de un mechero (bote de lata, trapo con diésel y fuego), este proceso consistía en someter al papel couché a fuego y humo, para generar un nuevo tambor de registro de color negro listo para registrar nueva información.



Figura 2. Ahumado de Tambor de registro sísmico.

Luego que el tambor de registro había terminado de registrar y grabar las señales sísmicas, se procedía al fijado de las bandas o registros sísmicos para su conservación, el cual consistía en sumergir la banda en alcohol con laca y dejarlo secar a temperatura ambiente (Fig. 3). Todo este proceso el auxiliar de sismología lo debía realizar diariamente, por lo que se generaba pérdida de tiempo e información. Durante crisis volcánicas se hacía durar menos tiempo el tambor para ampliar la resolución y en consecuencia el cambio, ahumado y fijado de la banda debía realizarse dos veces al día, siendo un proceso que consumía mucho tiempo.



Figura 3. Fijado y Conservación de bandas, registros sísmicos.

Finalmente el auxiliar de sismología encargado de procesar los datos sísmicos de los diferentes volcanes monitoreados, diariamente debían realizar el análisis y procesamiento de las señales registradas (Fig. 4). Los parámetros que se obtenían del registro sísmico eran: fecha y hora del evento, tipo de evento, coda, amplitud y periodo. Todos estos parámetros se los obtenía de forma manual y eran registrados en varios cuadernos, para finalmente ser ingresados a una hoja de cálculo.



Figura 4. Auxiliar de Sismología, realiza Análisis y Procesamiento de registros sísmicos del volcán Guagua Pichincha.

Con estos antecedentes se decide realizar el sistema informático de análisis y procesamiento de señales sísmicas (SIPASS), que actualmente constituye una herramienta de apoyo a los científicos y técnicos, en el análisis y procesamiento de las señales sísmicas de los volcanes. Esta nueva herramienta permite analizar los sismos mediante espectros, aplicar filtros, calcular y obtener automáticamente los parámetros requeridos dentro del análisis y procesamiento de señales sísmicas, esta información es almacenada en una base de datos, en un periodo de tiempo corto.

2. SISMICIDAD VOLCANICA

La sismicidad volcánica, es muy importante en la vigilancia volcánica, dado que es una de las primeras manifestaciones, cuando entra en un proceso eruptivo en el caso de volcanes inactivos, o que permite observar cambios en los niveles de actividad en volcanes activos. Las señales sísmicas originadas en los centros volcánicos, son propias de los sistemas y representativas de su actividad. Muchas investigaciones se han dedicado a estudiar las diferentes señales sísmicas que pueden producirse debido a la actividad volcánica. Todas han contribuido de acuerdo a sus experiencias en diferentes volcanes activos y con el avance en la tecnología en la clasificación de los sismos de origen volcánico [2], [5], [7], [9], [10].

2.1 Tipos de eventos sísmicos que se generan en los centros volcánicos.

Un primer paso para poder estudiar la sismicidad de un volcán, es determinar y caracterizar los diversos tipos de señales que se obtienen desde uno u otro tipo de fuente. A continuación, se describen algunas señales típicas que se registran en un volcán, cuando el sismómetro es de corto periodo o de banda ancha, atendiendo exclusivamente a su forma en el dominio del tiempo.

"Eventos Volcano-tectónicos VT". También clasificados como alta frecuencia, las características de estos es muy similar a los de origen tectónico, poseen frecuencias altas, en las trazas se pueden diferenciar las fases de la onda primaria (P) y la secundaria (S), generalmente se presentan en enjambres. El foco puede localizarse desde 1 a 20 km de profundidades y son localizados en o a distancias muy cercas del cráter activo. Son sismos asociados a rompimientos de rocas, aperturas de grietas. A menudo la actividad volcano-tectónica uno de los primeros signos de reactivación de un volcán, se ha visto que algunas erupciones han venido precedidas por un brusco incremento en este tipo de actividad sísmica [7]; en la (Fig. 5) se presenta un ejemplo de evento volcano-tectónico registrado en el volcán Tungurahua.

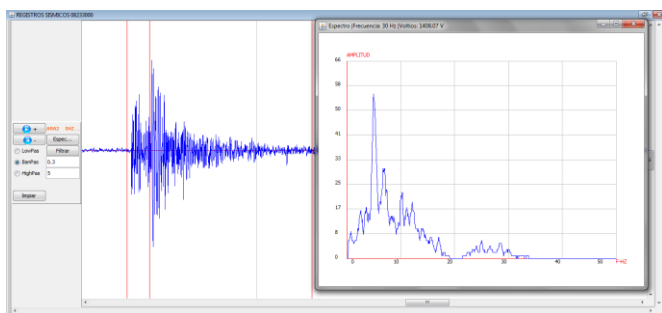


Figura 5. Evento volcano-tectónico, registrado el día 08/07/2013 a las 23h30 GMT en la estación ARA2 del volcán TUNGURAHUA. Se observa señal sísmica y espectro con frecuencia > 10 Hz.

"Eventos de Largo Periodo LP". Están relacionados al movimiento de fluidos magma y/o gases, son eventos de baja

frecuencia, típicos de ambientes volcánicos. Están caracterizados por tener una duración entre los pocos segundos hasta algo más de un minuto, y con un contenido espectral muy limitado a unas bandas de frecuencia relativamente estrecha ($0.5 < f < 5$ Hz). A menudo es posible encontrar eventos LP, que aparecen perdidos por llegadas algo menos energéticas, a frecuencias algo mayores ($f > 5$ Hz), su comienzo suele ser emergente, por lo que resulta muy difícil determinar el momento exacto del comienzo de la señal [3]. En la (Fig. 6) se presenta un ejemplo de evento LP registrado en el volcán Tungurahua.

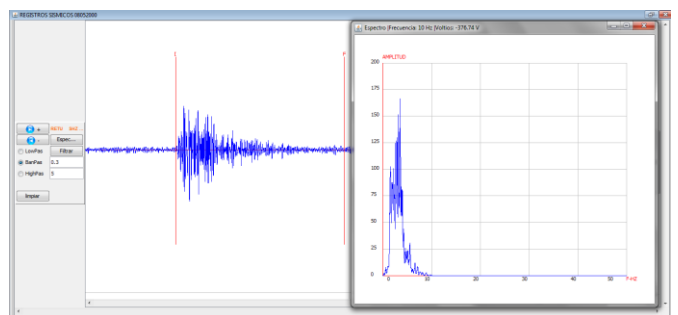


Figura 6. Evento LP registrado el día 08/07/2013 a las 05h20 GMT, en la estación de RETU del volcán TUNGURAHUA, se observa la señal sísmica y el espectro, mismo que se encuentra en un rango de 0 a 10 Hz.

"Eventos Híbridos HB". Como su nombre lo indica, son una combinación de los dos tipos anteriores, respondiendo a un fenómeno de fractura y movimiento de fluidos uno luego del otro o también simultaneos, resultando en un contenido espectral, donde se observa 2 picos característicos de los eventos VT y LP (Fig. 7). Este tipo de eventos tienen un comienzo de altas frecuencias, normalmente una amplia banda espectral hasta más allá de 10 Hz [11].

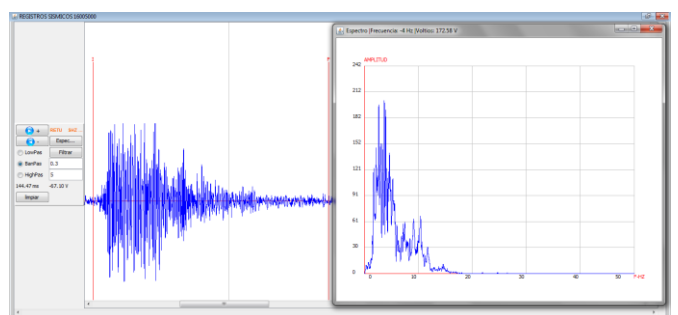


Figura 7. Evento HB, registrado el día 16/07/2013 a las 00h51 GMT en la estación RETU del volcán TUNGURAHUA, se observa el espectro que tiene 2 picos, la frecuencia > 10 Hz y el segundo la frecuencia > 15 Hz.

"Tremor Volcánico". El tremor volcánico es una señal sísmica caracterizada por mantener la amplitud constante durante un periodo de tiempo que puede oscilar entre los varios minutos y las horas (Fig. 8). Por otro lado el tremor volcánico está bien correlacionado con la salida de gases, vapor y ceniza [3].

- Tremor de alta frecuencia, es un tremor volcánico que contiene altas frecuencias > 6 Hz. Es ruido sísmico continuo que suele estar asociado a procesos superficiales como avalanchas, caídas de roca desde el frente de lava o fuertes desgasificaciones en los cráteres. A veces aparecen después de explosiones y pueden durar horas [3].
- Tremor Armónico, es tremor de frecuencias intermedias están en un rango de 1- 6 Hz. Pueden ser vibraciones de diversa duración, entre minutos a varias horas. En algunos volcanes el contenido espectral de este tipo de tremor está relacionado con el tipo de actividad, en fases tranquilas el tremor puede estar entre 1 Hz y en fases pre eruptivas las frecuencia varia hasta los 3 Hz [6].
- Tremor de baja frecuencia, posee frecuencias de alrededor de 0.5Hz o menos, normalmente se encuentra relacionado a oscilaciones del conjunto de la cámara magmática [6].

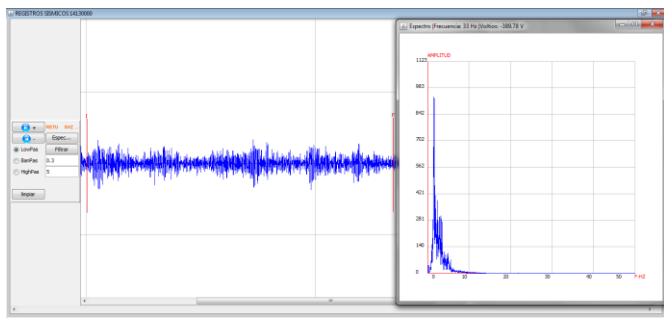


Figura 8. Tremor registrado el día 14/07/2013 a las 13h00GMT, en la estación de RETU del volcán TUNGURAHUA. Espectro con frecuencia > 6Hz.

"Explosiones". Las señales de explosiones en los edificios volcánicos corresponden, junto al tremor, a las señales sísmicas más características cuando se encuentra en marcha un proceso eruptivo. Estas señales por lo general tienen dos fases de llegada diferentes (Fig. 9). La primera asociada con la propagación en forma de ondas internas o superficiales de la explosión. La segunda es la llegada de lo que se conoce como ondas de aire, ondas de choque y ondas sonoras, con una velocidad de propagación clara de 340 m/s, [2], [3].

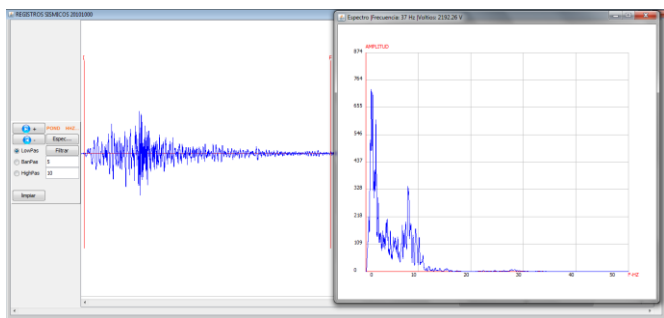


Figura 9. Explosión del día 20/07/2013 a las 10h17GMT en la estación de PONDOA del volcán TUNGURAHUA, Se observa señal sísmica acompañada de la onda acústica, espectro con dos picos, frecuencia >10Hz.

3. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA SIPASS

3.1 Selección de estaciones y visualización de la señal sísmica.

Esta nueva herramienta informática, trabaja con archivos sísmicos en formato SAC (Código de Análisis Sísmico). Permite la selección de las estaciones sísmicas (Fig. 10), donde el programa lee la información de los archivos y los guarda en variables temporales; con estas variables se genera el directorio principal con la información de las estaciones seleccionadas previamente (Fig. 11).

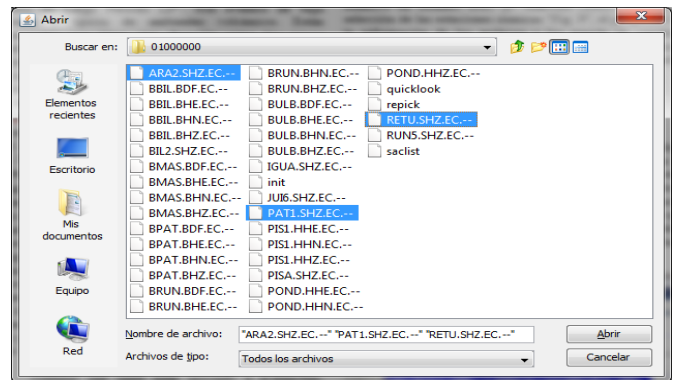


Figura 10. Archivos del volcán TUNGURAHUA, con las estaciones sísmicas.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 01000000 | 01010000 | 01020000 | 01030000 | 01040000 | 01050000 | 01060000 | 01070000 | 01080000 | 01090000 | 01100000 | 01110000 | 01120000 | 01130000 | 01140000 | 01150000 | 01160000 | 01170000 | 01180000 | 01190000 | 01200000 | 01210000 | 01220000 | 01230000 | 01240000 | 01250000 | 01260000 | 01270000 | 01280000 | 01290000 | 01300000 | 01310000 | 01320000 | 01330000 | 01340000 | 01350000 | 01360000 | 01370000 | 01380000 | 01390000 | 01400000 | 01410000 | 01420000 | 01430000 | 01440000 | 01450000 | 01460000 | 01470000 | 01480000 | 01490000 | 01500000 | 01510000 | 01520000 | 01530000 | 01540000 | 01550000 | 01560000 | 01570000 | 01580000 | 01590000 | 01600000 | 01610000 | 01620000 | 01630000 | 01640000 | 01650000 | 01660000 | 01670000 | 01680000 | 01690000 | 01700000 | 01710000 | 01720000 | 01730000 | 01740000 | 01750000 | 01760000 | 01770000 | 01780000 | 01790000 | 01800000 | 01810000 | 01820000 | 01830000 | 01840000 | 01850000 | 01860000 | 01870000 | 01880000 | 01890000 | 01900000 | 01910000 | 01920000 | 01930000 | 01940000 | 01950000 | 01960000 | 01970000 | 01980000 | 01990000 | 02000000 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|

Figura 11. Directorio principal de estaciones sísmicas.

A continuación se selecciona un archivo del directorio principal para realizar el procesamiento de la señal sísmica. El sistema carga la información y el usuario visualiza la señal en pantalla de la estación o las estaciones que se hayan seleccionado (Fig. 12), se debe activar el botón de herramienta para visualizar los campos, dentro del procesamiento se debe activar el modo de picado, si se presiona el botón de 2 picados el programa le permite seleccionar dos segmentos de la señal, si se activa 3 picados, en este caso el programa permite seleccionar tres segmentos de la señal. Este modo de selección solo se realiza para eventos volcano-tectónicos, para obtener el tiempo de arribo de la s-p, dependiendo del número de picados el programa obtendrá: fecha y hora, estación, s-p, coda, amplitud, periodo, frecuencia máxima, rms. Finalmente presionamos el botón de

guardar, la información obtenida será almacenada en la base de datos de volcanes.

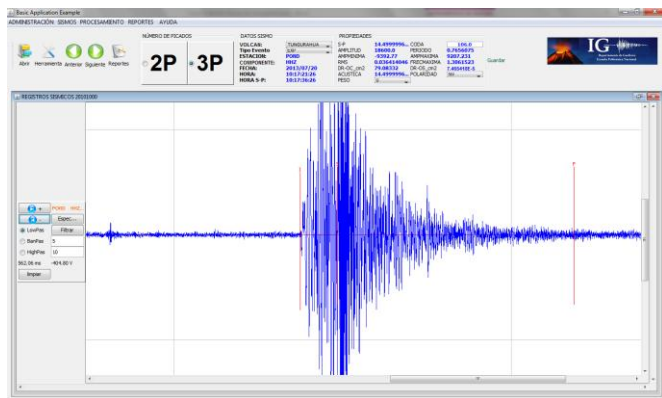


Figura 12. Pantalla de visualización y procesamiento de señales sísmicas, estación PONDOA, esta señal corresponde a una explosión registrada en el volcán Tungurahua el 20/07/2013 a las 10h17 GMT.

3.2 Determinación de tipo de evento sísmico en base al espectro.

Como se mencionó anteriormente, para determinar el tipo de evento de las señales sísmicas, se debe conocer los diferentes tipos de eventos sísmicos que los volcanes producen, el programa SIPASS, utiliza la FFT o Transformada Rápida de Fourier [8], para calcular el espectro de la señal, este algoritmo utiliza la información que genera la clase SAC, el programa verifica que el número de puntos almacenados en el arreglo, sea potencia de base 2 y si no lo es, el programa completa con ceros; finalmente el sistema realiza los respectivos cálculos y presenta en pantalla el espectro de la señal. El usuario verifica el rango de frecuencias y determina el tipo de evento, en la (Fig. 13) se observa una explosión registrada en la estación de PondoA se observa que la frecuencia es <10 Hz y posee dos picos, el primer arribo es la parte sísmica y el segundo arribo es la parte acústica.

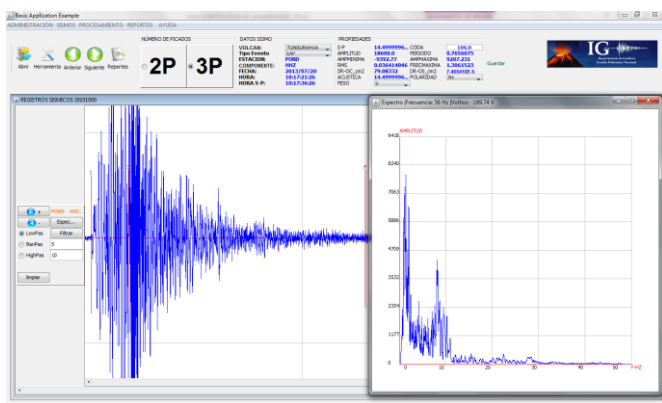


Figura 13. Espectro señal sísmica estación PONDOA, Explosión volcán Tungurahua frecuencias < 10 Hz, dos picos; uno de sísmica y otro de acústica.

3.3 Reportes y consultas de las señales sísmicas procesadas.

El sistema SIPASS, permite realizar la búsqueda de la información de las señales sísmicas procesadas, para lo cual se debe seleccionar cuatro parámetros como son: el volcán, tipo de evento, fecha desde y fecha hasta, debe presionar buscar y los resultados son presentados en pantalla (Fig. 14). Estos resultados, pueden ser exportados una hoja de Excel, esto permite a los usuarios actualizar la información estadística de los volcanes, que se llevan de manera paralela en soportes electrónicos menos versátiles.

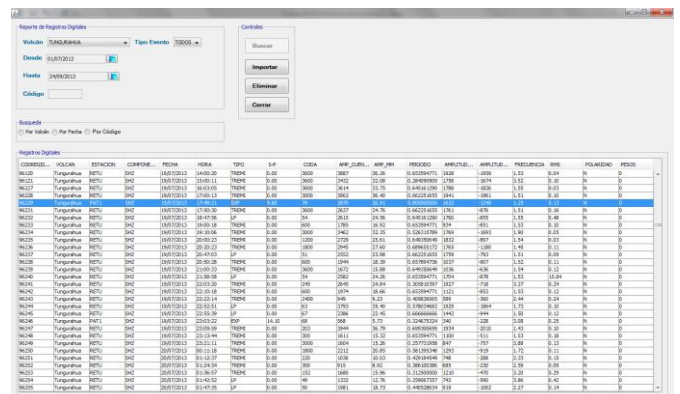


Figura 14. Reporte de señales sísmicas procesadas, señales procesadas del volcán TUNGURAHUA en la estación de RETU.

4. ARQUITECTURA DEL SISTEMA SIPASS

El sistema SIPASS utiliza una arquitectura 2 capas cliente-servidor, se desarrolla sobre la plataforma Java Estandar Edition (JSE), bajo el entorno de desarrollo Netbeans 7.1, que se ejecuta en el servidor de aplicaciones Apache Tomcat 6.0 y utiliza MySQL Server 6.0, como sistema de gestión de base de datos.

La arquitectura Cliente Servidor es importante, ya que la aplicación está instalada en diferentes estaciones de trabajo, mientras que la base de datos se encuentra centralizada en un servidor.

Varios usuarios pueden acceder a la base de datos desde cualquier estación de trabajo y a la vez estos mismos usuarios pueden trabajar analizando, clasificando y procesando las señales de un mismo volcán o de diferente volcán.

4.1 Principales clases utilizadas.

Dentro de la programación se implementaron varias clases, las principales y más importantes son: SAC es una biblioteca basada en (Código de Análisis Sísmico) para crear y administrar archivos de salida, la cual permite leer los archivos sísmicos que tienen este tipo de formato.

FFT (Fast Fourier Transform), algoritmo que permite realizar la transformada rápida de Fourier para obtener el espectro de la señal sísmica y calcular el periodo, en base al espectro se puede determinar qué tipo de señal es.

La clase Filtrado, permite quitar el ruido de fondo de la señal sísmica, el sistema utiliza tres tipos de filtrado, BandPass, LowPass y HigPass. Aplicando cualquiera de estos filtros, será posible observar con mucha claridad el evento.

Graphics, hizo uso de esta clase ya que posee algunos métodos que permiten graficar la información sísmica y el espectro de la señal.

5. DISCUSIÓN

5.1 Erupción del 14 de diciembre, 2012 volcán TUNGURAHUA.

El sistema SIPASS, empezó a funcionar desde marzo del 2011 sin ningún tipo de inconveniente, había funcionado en crisis pequeñas, pero no se lo había puesto a prueba durante una erupción. El 14 de diciembre del 2012 se produjo una erupción vulcaniana del volcán Tungurahua. El auxiliar de sismología encargado de procesar esta información; con la ayuda del sistema, rápidamente pudo analizar, clasificar y procesar las señales sísmicas, mismos datos permitieron ver cómo iba evolucionando estadísticamente la erupción que estaba en curso (Fig. 15), en lo que corresponde a la parte sísmica.

En erupciones anteriores, esto no era posible ya que el técnico encargado de realizar este proceso lo debía realizar de forma manual, esto le tomaba de 5 a 6 horas por lo que la información no estaba disponible en tiempo real.

Uno de los problemas que se tenía dentro del análisis y procesamiento de las señales, era en la lectura de bandas debido a que varias personas realizaban esta tarea. Esto causaba que algunos eventos estén mal clasificados o identificados, ya que algunas personas no tenían el mismo entrenamiento, ni un mismo criterio. Por lo que se generaba una base de datos inhomogénea.

Con el sistema SIPASS se eliminó esto, debido a que las frecuencias son calculadas directamente desde la señal en un sistema digital. El auxiliar de sismología ya no podrá equivocarse al realizar el análisis y clasificación de las señales sísmicas, porque están definidas por su forma y sus frecuencias y así se obtiene una base de datos homogénea.

Se está desarrollando una nueva versión, la cual permitirá a futuro realizar localizaciones de los sismos procesados. Esto servirá para ver donde están localizados y a que profundidad se encuentran.

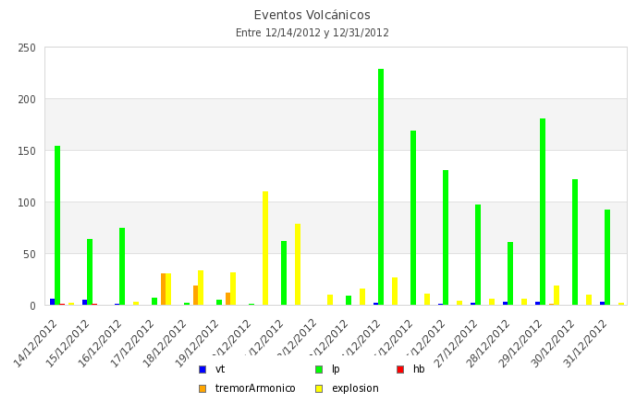


Figura 15. Datos estadísticos erupción del 14 de Diciembre 2012, volcán TUNGURAHUA.

6. CONCLUSIONES

Se eliminaron los registros de papel y el proceso de ahumado y fijado de bandas, el proceso de análisis, clasificación y procesamiento de señales sísmicas se lo realiza de forma digital, lo cual ha reducido notablemente el tiempo que les tomaba realizar este proceso. La infraestructura ha mejorado ya que se eliminaron los equipos sísmicos donde se registraba la información generada por los diferentes volcanes, en su lugar se colocaron pantallas en donde se visualiza esta información (Fig. 16).

Las señales sísmicas registradas por las estaciones sísmicas, son procesadas casi en tiempo real. El sistema SIPASS, permite analizar grandes cantidades de información sin que colapse o tenga algún inconveniente. Posee interfaces amigables, lo cual facilita su uso y manejo. Tanto los sistemas operativos de Windows y Linux utilizan Java Runtime Environment (JRE, Java Runtime), el sistema SIPASS puede funcionar sin problemas en cualquiera de esta dos plataformas, haciéndolo muy versátil.



Figura 16. Sala de registradores en la Actualidad.

RECONOCIMIENTO

Dra. S. Hidalgo, MSc. M. Segovia, "Muchas Gracias".

REFERENCIAS

- [1] B. Bernard, D. Andrade. 2011. Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental, IGEPN Poster Informativo.
- [2] B. A. Chouet. (1996). Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting, *Nature*, 380: 309-316.
- [3] B. A. Chouet, G. Saccorotl, M. Martini, P. Dawson, G. De Lucia, G. Milana, R. Scarpa. (1997). Source and path effect in the wave fields of tremor explosions at Stromboli volcano, Italy, *Journ. Geophysics. Res.*, 102: 15129-15150.
- [4] F. Barberi, M. Coltelli, G. Ferrara, F. Innocenti, J.M. Navarro and R. Santacroce. 1988. Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine* 125 (1): 1-14.
- [5] I. Latter. (1979). Types and classification of volcanic earthquakes, 1976-1978. Geophysical Division Volcanological Observations at Tongariro National Park, Department of Scientific and Industrial Research Report N°150, 60pp.
- [6] J. Almendros, J. Ibañez, R. Ortiz. Array tracking of volcanic tremor source at Deception Island, Antartica, *Geophys.res Lett.*, 24:3069-3072.
- [7] J. P. Beniot, R. McNutt. (1996). Global volcanic earthquake swarm database and preliminary analysis of volcanic earthquake swarm duration. *Annali di Geofisica*, vol XXXIX, n2: 221-230.
- [8] R. Sedgewick and K. Wayne, *Class Fast Fourier Transform*, March 2011.
- [9] S. R. McNutt. (2000a). Volcanic seismicity. In: Sigurdsson H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press San Diego, 1015-1033.
- [10] T. Minakami. (1974). *Seismology of Volcanoes in Japan: Physical Volcanology*. Elsevier, Amsterdam, 1-27p.
- [11] V. Ferrazzini, K. Aki, B.A. Chouet. (1991). Characteristics of seismic waves composing Hawaiian volcanic tremor and gas-piston events observed by a near-source array, *Journ. Geophysics. Res.*, 96: 6199-6209.