

Caracterización de eventos volcánicos explosivos a partir de las señales sísmicas del volcán de Colima, México, para la identificación de nivel de peligro volcánico

Félix Ortigosa¹, Vyacheslav Zobin², Mauricio Bretón², JRG Pulido¹,
Ruben Ruelas³, Benjamin Ojeda³

¹ Universidad de Colima,
Facultad de Telemática,
México

² Universidad de Colima,
Centro Universitario de Estudios Vulcanológicos,
México

³ Universidad de Guadalajara,
Departamento de Ingeniería de Proyectos,
México

{felix,vzobin,mauri,jrgp}@ucol.mx,
rubrule@gmail.com, benajo@hotmail.com

Resumen. El volcán de Colima es uno de los volcanes más activos de México, por lo tanto, es necesario un monitoreo constante de su actividad explosiva para dar una alerta oportuna del peligro volcánico para las poblaciones cercanas. Cada evento explosivo genera ondas sísmicas. Las características de las señales sísmicas pueden servir para identificar un evento explosivo como fuerte, o como un evento explosivo débil. Por eso, la identificación rápida del tipo de evento explosivo puede ser importante para la estimación del nivel de peligro para las poblaciones cercanas. Normalmente la identificación del tipo de señal sísmica producto de las explosiones se realiza después de haber finalizado el evento (análisis *off-line*). Una mejora al tipo de análisis *off-line* es realizar un análisis en el momento que se origina la señal sísmica explosiva continua (análisis *on-line*) ya que esto permitirá determinar el tipo de señal sísmica en una etapa temprana donde se origina el evento. Se desarrolló un algoritmo que permite identificar el tipo de señal sísmica mediante el análisis (*on-line*) y emitir una alarma a la población de la ocurrencia de un evento explosivo fuerte con una probabilidad de peligro alta. Los resultados obtenidos por nuestro algoritmo de análisis *on-line*, muestran que se puede identificar el tipo de evento sísmico de igual manera que mediante el método *off-line*.

Palabras clave: Volcán de Colima, explosiones, señales sísmicas, monitoreo sísmico, monitoreo visual.

Characterization of Explosive Volcanic Events from the Seismic Signals of the Colima Volcano in Mexico, for the Identification of the Level of Volcanic Danger

Abstract. Colima's volcano is one of the most active volcanoes in Mexico, therefore, constant monitoring of its explosive activity is necessary to provide a timely warning of volcanic danger for nearby populations. Each explosive event generates seismic waves. The characteristics of the seismic signals can serve to identify an explosive event as strong, or as a weak explosive event. Therefore, the rapid identification of the type of explosive event can be important for estimating the level of danger for nearby populations. Normally, the identification of the type of seismic signal produced by the explosions is carried out after the event has ended (*off-line* analysis). An improvement to the *off-line* type of analysis is to perform an analysis at the moment the continuous explosive seismic signal originates (*on-line* analysis) since this will allow determining the type of seismic signal in one stage early where the event originates. An algorithm was developed that allows identifying the type of seismic signal through analysis (*on-line*) and issuing an alarm to the population of the occurrence of a strong explosive event with a high probability of danger. The results obtained by our on-line analysis algorithm show that the type of seismic event can be identified in the same way as using the off-line method.

Keywords: Colima volcano, explosions, seismic signals, seismic monitoring, visual monitoring.

1. Introducción

El Volcán de Colima es uno de los volcanes más activos de México, por tal motivo su monitoreo es constante registrando todos los eventos de su actividad. Una explosión volcánica puede ocurrir en el volcán en cualquier momento, evento eruptivo que puede contener gas, ceniza o piedra volcánica. Dependiendo de la energía liberada desde el interior hasta el cráter del volcán [10] y las consecuencias de una explosión volcánica de magnitud VEI ≥ 4 , (Volcanic Explosivity Index) serían devastadoras en las poblaciones cercanas, principalmente por lluvia de ceniza, flujos piroclásticos y flujos de lava [6,13].

En la actualidad existe un monitoreo constante del Volcán de Colima por las redes de monitoreo sísmico y el monitoreo visual del Centro Universitario de Investigaciones Vulcanológicas de la Universidad de Colima *et al.* en [12]. Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se explica cómo se obtiene la información mediante el sistema de monitoreo del Volcán de Colima, registrando por una parte las imágenes y por la otra la señal sísmica.

En la sección 3 se describe la señal sísmica de una explosión y sus características. En la sección 4 se presenta el método para procesar la información

on-line. En la sección 5 se describen los resultados, y por último se presentan las secciones de discusión y conclusiones.

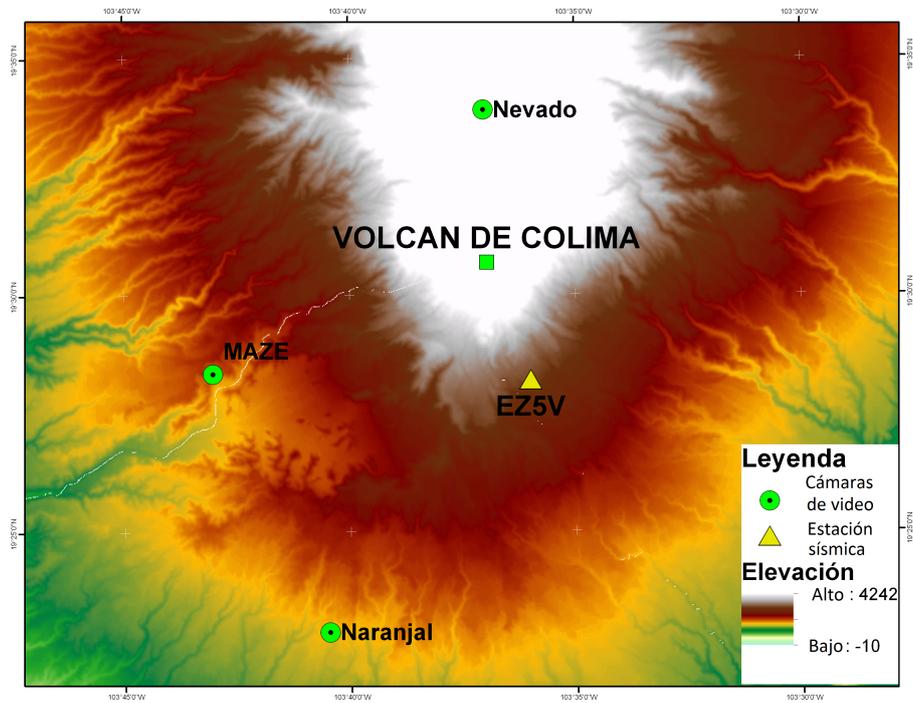


Fig. 1. Ubicación de las tres cámaras de video y de una estación sísmica de la Red de Monitoreo del Centro Universitario de Estudios Vulcanológicos de la Universidad de Colima.

2. Descripción del sistema de monitoreo

La actividad del Volcán de Colima es vigilada mediante la red de monitoreo sísmico y visual del Centro Universitario de Estudios Vulcanológicos de la Universidad de Colima. La Figura 1 muestra la posición geográfica del sistema de monitoreo de la actividad explosiva del volcán usada en nuestro estudio que consiste en las tres cámaras de video y una estación sísmica. Nuestro estudio está basado en los registros sísmicos identificados con las imágenes de video de las explosiones correspondientes.

2.1. Monitoreo visual

La red de monitoreo visual registra mediante el uso de cámaras y desde diferentes distancias, los diferentes eventos ocurridos durante las veinticuatro

horas del día. Estas imágenes son transmitidas al sistema central de monitoreo, para su posterior procesamiento [2]. Para este estudio utilizamos 3 cámaras, cada cámara registra una imagen en intervalos de 3 a 30 segundos, por minuto dependiendo de las condiciones climatológicas. En la Tabla 1 se describen las características que poseen cada una de las cámaras utilizadas.

Tabla 1. Descripción de las cámaras de video.

Nombre de Estación	Período de observación	Resolución pixels	Modelo de cámara	Zona de monitoreo	Distancia Focal (mm)	Coordenadas Geográficas		Distancia al cráter de volcán (km.)
						Long., W	Lat., N	
Nevado	2008-2014	704x479	Axis 213 PTZ	Crater y Domo	3.5-91	19,564°	-103,617°	5.3
Naranjal	1998-2014	704x480	Axis 213 PTZ	Lahares, Derrumbes, y edificio volcánico	3.5-91	19,381°	-103,674°	15.67
MAZE	2011-2014	704x480	Axis 213 PTZ	Lahares, Derrumbes, y edificio volcánico	3.5-91	19,473°	-103,717°	11.3

Tabla 2. Descripción del sismómetro.

Estación	Modelo	Sensibilidad	Inicio Operación	Long., W	Lat., N	Distancia desde la estación al cráter del volcán km.	Azimut al volcán (°)
EZ5V	T4016	7.95E-10	01/06/2001	-103.602	19.479	4	157

2.2. Monitoreo sísmico

La red sísmica registra los diferentes eventos sísmicos ocurridos en el Volcán de Colima desde diferentes distancias, y realiza mediante la transmisión de señales sísmicas continuas durante las veinticuatro horas del día, en tiempo real, al departamento RESCO (REd Sismológica del estado de Colima) del Centro Universitario de Estudios Vulcanológicos de la Universidad de Colima, donde son almacenadas y procesadas.

Para este estudio utilizamos una estación sísmica denominada EZ5V, situada a 4 km del cráter del Volcán de Colima y descrita en la Tabla 2. Este sismómetro digital de banda ancha registra señales sísmicas con una frecuencia de muestreo de 100 muestras/s. Seleccionamos esta estación debido a la cercanía al cráter del volcán, además es la que mejor registra los eventos explosivos [16].

3. Descripción y análisis de la señal sísmica de explosión volcánica

Las señales sísmicas de explosiones representan los registros que consistan de las dos fases, preliminar (pre-explosiva) y principal (co-explosiva). En la Figura 2 son identificadas entre t_1 y t_2 para la primera fase y t_2 y t_3 para la segunda fase. De acuerdo con el modelo de las explosiones volcánicas, propuesto en [11], se puede identificar dos tipos de registros sísmicos de explosiones según sus fases preliminares. Se considera que la fase sísmica preliminar en caso de registrar

tipo 1, representa un registro de baja frecuencia, se genera durante el ascenso del magma fragmentado a la superficie dentro del conducto del volcán.

Considerando que el magma que asciende de las profundidades dentro del conducto del volcán en caso de registrar tipo 1 puede producir explosiones más fuertes. La fase sísmica preliminar en caso de registrar tipo 2, representa un registro de alta frecuencia está considerado como el resultado de la fractura de un domo de lava subsuperficial con salida de magma y gas, por lo tanto esto puede producir una explosión débil. Por consiguiente, nuestro problema es identificar el registro tipo 1 ó 2 de las señales sísmicas y en caso de ocurrencia de registro o señales tipo 1, dar una alarma esperando una explosión fuerte.

La Figura 2c-d. y la Figura 2e-f, muestra una representación del espectro de Fourier, de los picos de frecuencia entre 0 y 3 Hz. Zobin *et al.* en [15] describen que la señal sísmica de baja frecuencia en su fase de pre-explosiva tienen una duración entre 3 y 7 segundos.

Para nuestro estudio, se desarrolló un algoritmo para identificar en tiempo real el tipo de señal sísmica de tipo explosión. El algoritmo considero que la señal está compuesta de tres fases: fase de ruido precedente a la señal, fase preliminar que puede servir para identificación del tipo de señal, y fase de explosión, véase Figura 3. En la fase de ruido, las señales sísmicas contienen ruido debido a factores externos que registra el sismógrafo.

El ruido está presente constantemente en la señal y dependiendo de los factores externos puede ser mayor o menor que la información del evento detectado. Este ruido puede ser atenuado con filtros pasa bajos a 0.5 Hz [1,14,4,11]. En la fase de identificación los eventos sísmicos utilizan la frecuencia como característica principal para clasificar los eventos sísmicos de tipo explosión.

Por último en la fase de explosión, se caracterizan por tener una amplitud en esta fase se calcula la energía liberada en Joules, del evento explosivo para la toma de decisiones, se pretende el cálculo automático de este valor para un trabajo futuro.

4. Métodos y datos

El algoritmo propuesto para la identificación on-line del tipo de explosión analiza la señal sísmica (pre-explosiva) de los eventos en un mínimo de tiempo así como el tipo de explosión. Después el algoritmo tiene que dar una estimación de energía de la explosión y decidir una necesidad en alerta para la población. En nuestro estudio utilizamos la primera etapa del algoritmo, la clasificación de la explosión en la fase de identificación.

La segunda etapa solo una parte, el calculo de frecuencias en la fase de identificación, y en la tercera etapa de la fase de explosión, se pretende desarrollar el cálculo automático de la energía liberada de este valor de modo on-line para un trabajo futuro.

La aplicación del algoritmo se realiza en tres etapas cada una con diferentes pasos descritos en la Figura 4. Estos pasos son utilizados para detectar un evento explosivo fuerte en la fases de una señal sísmica como se menciona a continuación:

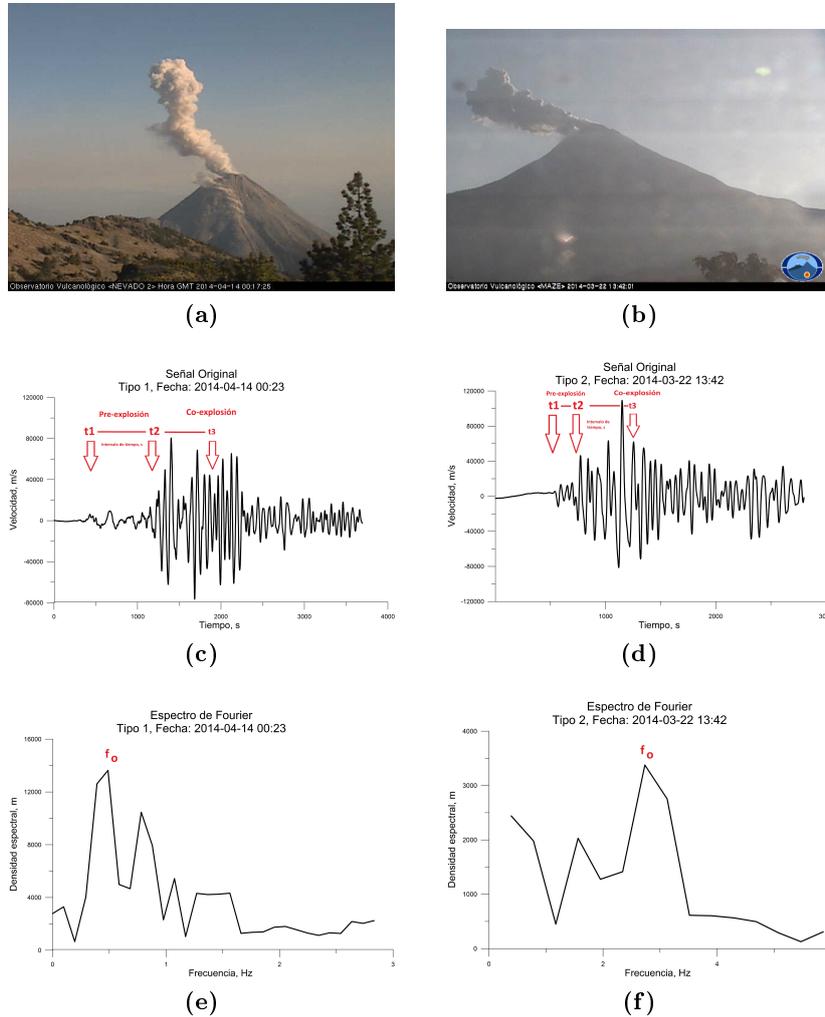


Fig. 2. Imágenes de dos tipos de explosiones volcánicas, (a) fuerte, (b) débil. Registros sísmicos: (c) tipo 1. Señal original registrada el 2014-04-14 a las 00:23 horas, (d) tipo 2. Señal original registrada el 2014-03-22 a las 13:42 horas. Espectros de Fourier de las señales de fases preliminares: (e) tipo 1, (f) tipo 2 donde se muestran las frecuencias f_0 .

- Seleccionar el registro sísmico de explosión (estación EZ5v),
- Discriminar el ruido en la fase preliminar,
- Calcular el espectro Fourier de la fase preliminar,
- Identificar el tipo de explosión mediante su frecuencia espectral,
- Calcular el espectro Fourier de la fase de explosión,
- Calcular la energía de la fase de explosión,

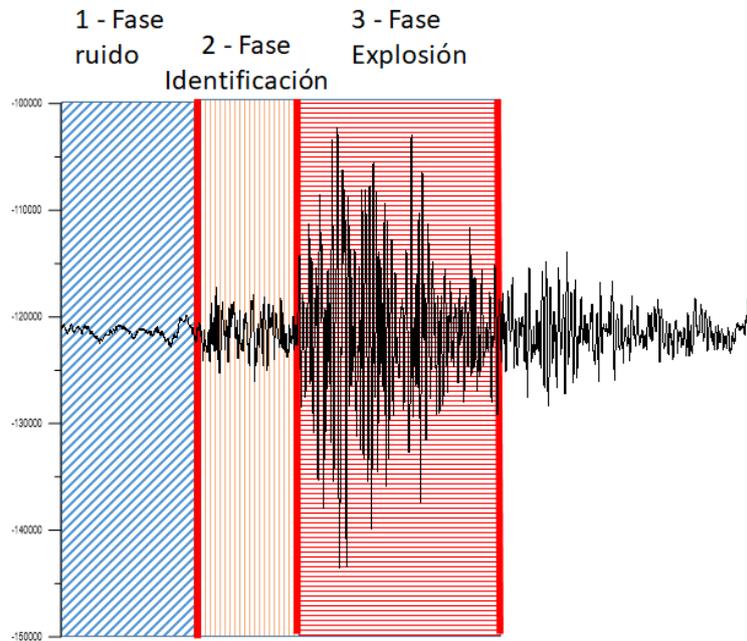


Fig. 3. Descripción de las fases de una señal sísmica explosiva.

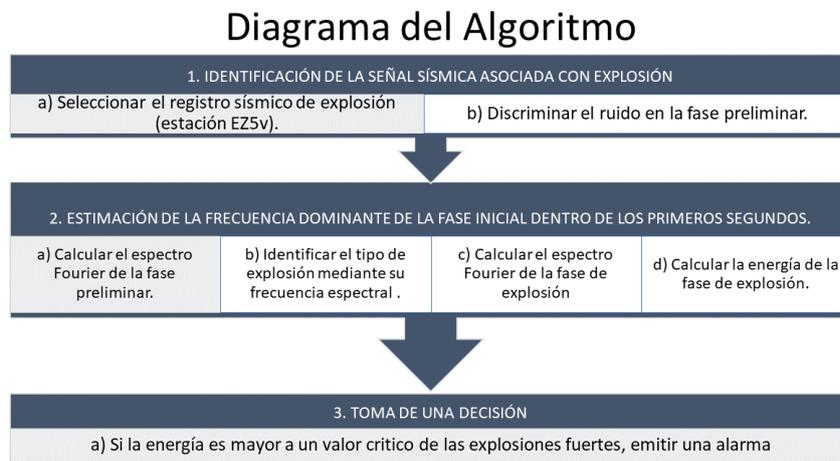


Fig. 4. Algoritmo para la identificación on-line.

- Si la energía es mayor a un valor crítico de las explosiones fuertes, emitir una alarma.

Este estudio utilizó la información registrada por el monitoreo sísmico y el monitoreo visual por un periodo de 18 meses, enero-diciembre 2013 y enero-julio 2014. Se utilizaron las imágenes visuales digitales y los sismogramas digitales

de la señal sísmica. Con la información proporcionada por el monitoreo visual se clasificaron las imágenes con una nube de ceniza característica con duración entre 10 y 20 segundos, obteniendo la fecha y hora del evento, consideradas como grandes; con esta información se encontraron un total de 1590 explosiones grandes. La Figura 5 muestra el registro mensual de las explosiones encontradas por cámara del periodo analizado.

Con la información del monitoreo sísmico, se analizó el sismograma de la señal sísmica tomando como referencia la Figura 2. El análisis de las secuencias de imágenes de video junto con los registros sísmicos de explosiones del Volcán de Colima mostró que unos segundos antes de la ocurrencia de la explosión del cráter de volcán, se inicia el registro sísmico preliminar en la señal sísmica de la frecuencia baja (tipo 1) o frecuencia alta (tipo 2), de amplitud muy baja. Después de estas señales preliminares tenemos también el registro de la misma explosión con amplitud más alta (Figura 2).

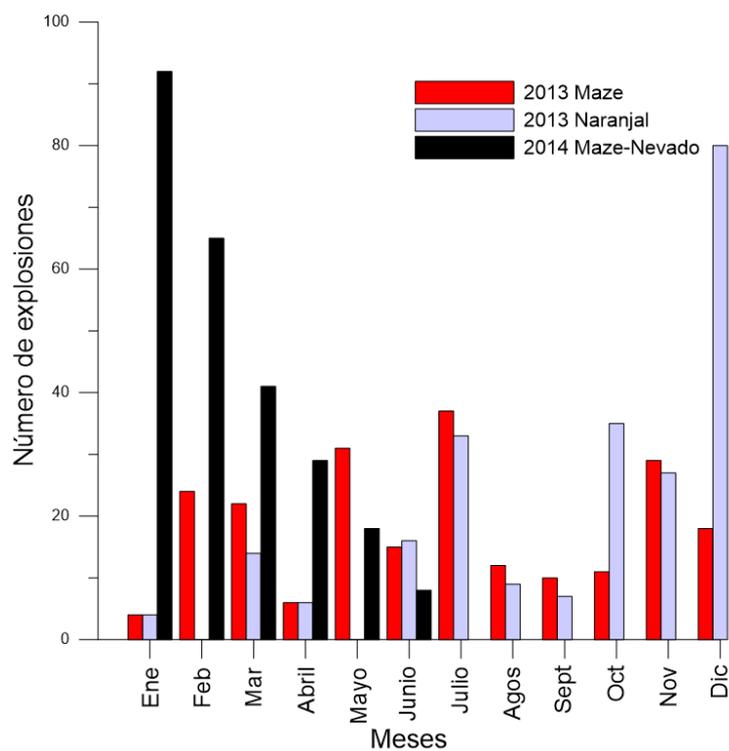


Fig. 5. Eventos clasificados mensualmente por cámara de explosiones ocurridas en el 2013-2014.

5. DEGTRA A4 y script en MATLAB

Para el procesamiento de una señal sísmica se utilizaron dos programas DEGTRA A4 y un script basado en Matlab. El programa DEGTRA A4, ha sido desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM). DEGTRA A4 es una herramienta académica de distribución gratuita académica. En Degtra A4 se procesa una señal en cualquier derivación con respecto a las necesidades del usuario, sismólogos e ingenieros sísmicos.

Entre sus características encontramos que utiliza filtros básicos y avanzados, y permite evaluar, la coherencia, la correlación cruzada, integrar, derivar, calcular espectros de amplitud de Fourier, mostrar en forma de odograma los registros sísmicos de componentes diferentes, rotar, sumar, restar, corregir la línea base de diversas formas, entre otras funciones, [7].

Por otra parte, el script en Matlab es una derivación de la aplicación de Lesage [5] con características ad hoc de eventos sísmicos, aplicadas a las necesidades del estudio, denominadas como el algoritmo. Cabe mencionar que el modo de análisis off-line es el diagnóstico del experto después de ocurrido el evento y el modo on-line es un análisis mediante un algoritmo sin ayuda del experto.

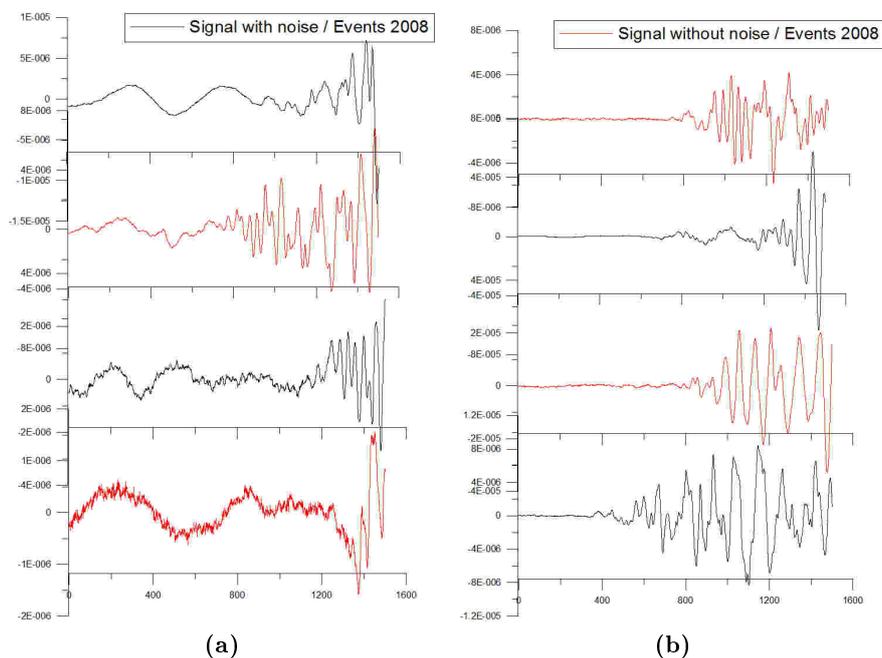


Fig. 6. Señal sísmica explosiva: a) Con ruido, b) Sin ruido.

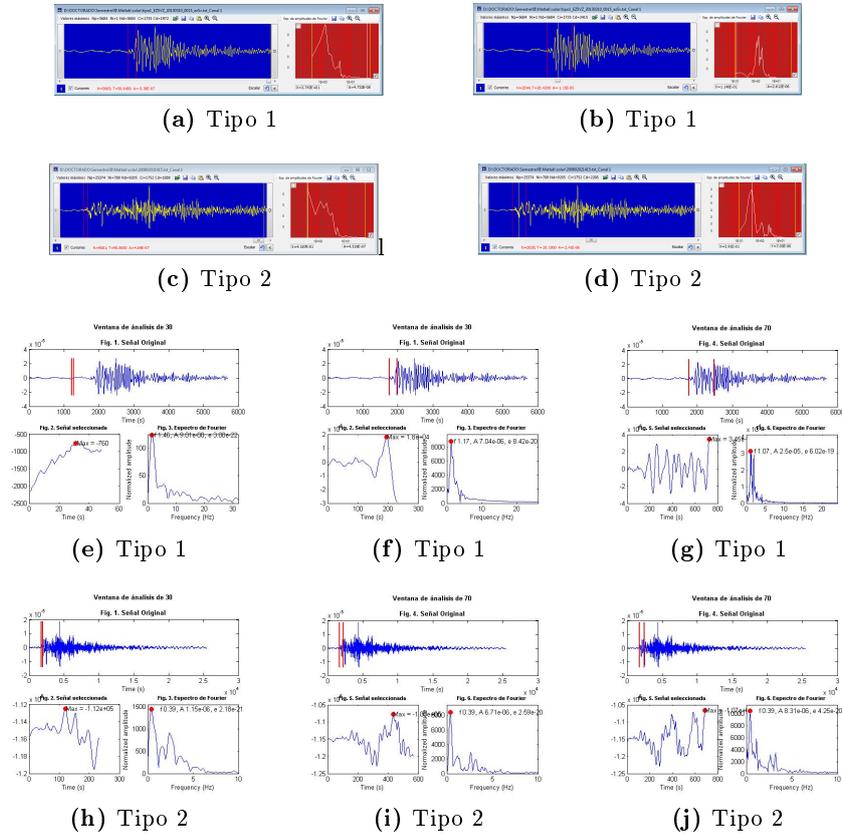


Fig. 7. Imágenes de la identificación de eventos sísmicos usando el programa DEGTRA A4 y el algoritmo. a,b,c,d utilizan el programa DEGTRA A4; e,f,g,h,i,j utilizan el algoritmo; a,b,e,f,g son señales Tipo 1; c,d,h,i,j son señales Tipo 2.

6. Resultados

Analizando cada sismograma individualmente se encontró que la fase de ruido está muy presente en algunas señales, por lo tanto se aplicó el filtro pasa bajos a 0.5 Hz. Sin embargo, al aplicar el filtro se elimina parte de la información de toda la señal sísmica; por lo tanto los resultados para la clasificación por tipo de explosión (tipo 1 y 2) no eran satisfactorios, y por ello se volvió a clasificar los sismogramas sin aplicar el filtro, eliminando los sismogramas con un ruido muy evidente, véase Figuras 6a y 6b con ruido y sin ruido respectivamente. Para este estudio fueron seleccionados 90 eventos sin ruido, véase Tabla 4.

Al aplicar el algoritmo se obtuvieron los valores de frecuencia de las fases preliminares para realizar una comparación entre frecuencias obtenidas con el programa DEGTRA A4 y el algoritmo, véase Figura 7a,b,e,f,g para un evento

Tabla 3. Valores de eventos Tipo 2.

DEGTRA A4	Algoritmo
f, Hz	f, Hz
2.34	2.25
1.95	1.86
2.73	2.54
2.73	0.49
1.56	2.54
1.76	1.76
2.73	2.93
1.95	1.95
1.56	1.56
1.56	2.05
2.73	2.64
1.95	1.86
2.73	2.64
2.73	1.46
2.73	2.64
1.95	1.66
A	B

Tabla 4. Número de eventos analizados.

A	2013 (1-12)	2014 (1-6)
Tipo 1	37	37
Tipo 2	10	6
Total	47	43

Tipo 1 y Figura 7c,d,h,i,j para un evento Tipo 2. La Tabla 5 muestra los datos para eventos Tipo 1, las columnas A y B muestra los valores obtenidos con el programa DEGTRA A4; las columnas C y D muestra los valores obtenidos por el algoritmo; la Tabla 3 se muestran los datos para eventos Tipo 2, la columna A muestra los valores obtenidos con el programa DEGTRA A4; la columna B muestra los valores obtenidos por el algoritmo.

Esta prueba se realizó con el programa estadístico SPSS [9,3,8]. Con estos datos se muestra que el análisis en modo on-line es bastante seguro e informativo para dar alerta de peligro volcánico en caso de ocurrencia de eventos explosivos de tipo 1. Con los datos de los eventos Tipo 1 y Tipo 2 fue realizada una prueba estadística T para grupos relacionados como hipótesis nula H_0 : El valor de la frecuencia es el mismo entre la primera y la segunda medición con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Los valores del grupo a son los valores obtenidos con el programa DEGTRA A4 *off-line*, y el grupo b los valores obtenidos con el algoritmo *on-line*. Véase Tabla 6.

Tabla 5. Valores de eventos Tipo 1.

DEGTRA A4		Algoritmo	
f, Hz	f, Hz	f, Hz	f, Hz
0.39	0.39	0.39	0.39
0.88	0.39	0.88	0.39
0.98	0.39	0.98	0.39
0.78	0.49	0.78	0.49
0.39	0.49	0.39	0.49
0.78	0.49	0.78	0.49
0.78	0.49	0.78	0.49
0.88	0.49	0.88	0.49
0.78	1.17	0.78	1.17
0.49	0.78	0.49	0.78
0.88	0.49	0.88	0.49
0.39	0.78	0.39	0.78
0.88	0.49	0.88	0.49
1.07	0.78	1.07	0.49
0.78	0.78	0.78	0.39
0.39	0.49	0.39	0.49
0.39	0.49	0.39	0.49
1.17	0.39	1.17	0.39
0.78	0.78	0.78	0.78
0.88	0.39	0.88	0.39
0.78	0.49	0.78	0.39
0.49	0.78	0.49	0.78
0.78	0.49	0.78	0.49
0.44	0.78	0.39	0.78
0.78	0.88	0.78	0.88
0.59	0.49	0.49	0.49
0.49	0.39	0.49	0.39
0.39	0.39	0.39	0.39
0.49	0.78	0.49	0.88
1.17	0.88	1.27	0.88
0.39	0.78	0.39	0.59
0.39	0.39	0.39	0.39
0.44	0.39	0.49	0.39
0.88	0.49	0.88	0.39
0.78	0.59	0.78	0.59
0.39	0.39	0.39	0.39
0.49	0.39	0.49	0.39
A	B	C	D

7. Discusión

Como se puede observar en los resultados, el algoritmo propuesto tuvo un mejor rendimiento para eliminar la información en la fase de ruido y una mejor identificación en la fase inicial de la señal sísmica en eventos Tipo 1 ó 2, para encontrar los valores de frecuencia.

Con esto se prueba que no es necesario analizar la señal sísmica en modo off-line para identificar el tipo de explosión, es decir, es posible identificarla en

Tabla 6. Resultado al aplicar la prueba T.

	a	b	a >= b
	SPSS	Valores Table t;	
Type 1 (n=74)	t= 1.716; gl=73; p= 0.090	t=1.6660; gl=73; p=0.05	1.716 >= 1.660 0.090 >= 0.05 Accept Ho
Type 2 (n=16)	T=1.009; gl=15; p= 0.329	t=1.7531; gl=15; p=0.05	1.009 >= 1.7531 0.329 > 0.05 Accept Ho

modo on-line. Con la prueba T se justificó que los valores obtenidos de frecuencia con el algoritmo y el programa DEGTRA A4 son muy similares con un porcentaje de confiabilidad del 95 %.

La Tabla 6 muestra que el nivel de significancia calculado de 0.090 es mayor que el 0.050 esperado, para los eventos Tipo 1; para el valor de significancia de 0.329 es mayor que el 0.05 esperado, para los eventos Tipo 2. Por lo tanto, se acepta la hipótesis de que la frecuencia es la misma para el programa DEGTRA A4 y para el algoritmo.

8. Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado la identificación en tiempo real de los eventos explosivos con alta peligrosidad para poblaciones cercanas al Volcán de Colima, lo que es de vital importancia para ganar tiempo en la emisión de alarmas y con ello mitigar los posibles daños a consecuencia de las explosiones. Con esto se cambia el enfoque actual de un sistema de información sobre lo sucedido a un sistema de actuación sobre lo que está ocurriendo. Para el cálculo automático del valor de la energía liberada del evento explosivo, en Joules, se pretende realizar como trabajo futuro, así como la implementación del algoritmo para la identificación automática de los eventos explosivos y la emisión de las alarmas correspondientes.

Agradecimientos. A Mario Ordaz por el procesamiento de las señales sísmicas digitales con el programa DEGTRA A4, a Phillippe Lessage por la colaboración en su programa y al CUIV de la Universidad de Colima por su ayuda y colaboración en esta investigación. F. Ortigosa agradece al CONACyT y a la Universidad de Colima por financiar sus estudios de Doctorado.

Referencias

1. Abreu, R. D., Reddan, S., Parent, J., Johnson, D.: Seismic event detection using three-component data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, vol. 30, no. 3, pp. 642–644 (1992)

2. Bretón-Gonzalez, M., Campos, A., León, Z., Plascencia, I., Ramirez, J. J.: The 2007-2012 lava dome growth in the crater of Volcan de Colima, México, derived from video monitoring system. *Complex Monitoring of Volcanic Activity Methods and Results*, pp. 153–170 (2013)
3. Castañeda, B., Cabrera, A., Navarro, Y., De Vries, W.: *Procesamiento de datos y analisis estadísticos utilizando SPSS*. EdiPUCRS (2010)
4. Duin, R. P., Orozco-Alzate, M., Londono-Bonilla, J. M.: Classification of volcano events observed by multiple seismic stations. In: *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*. pp. 1052–1055. Ieee (2010) doi: 10.1109/ICPR.2010.263
5. Lesage, P.: Interactive matlab software for the analysis of seismic volcanic signals. *Computers Geosciences*, vol. 35, no. 10, pp. 2137–2144 (2009) doi: 10.1016/j.cageo.2009.01.010
6. Mauricio Breton- Gonzalez, Ramirez, J. J., Navarro, C.: Summary of the historical eruptive activity of Volcan de Colima, Mexico 1519-2000. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 117, pp. 21–46 (2002)
7. Ordaz, M., Francisco, C., Zapata, A.: *Manual DEGTRA A4 Ver 5.4 1* (2005)
8. Roberto Hernandez, S., Collado Fernandez, C., Baptista Lucio, M. d. P.: *Metodología de la Investigación*. McGraw Hill (2010)
9. Segnini, S.: *Fundamentos de bioestadística* (2008)
10. Sigurdsson, H.: Explosive volcanism. *Encyclopedia of Volcanoes*, pp. 420–696 (2000)
11. Zobin, V. M.: Seismic signals associated with volcanic explosions. *Introduction to Volcanic Seismology*, pp. 295–326 (2012)
12. Zobin, V. M., Arámbula, R., Bretón, M., Reyes, G., Plascencia, I., Navarro, C., Téllez, A., Campos, A., González, M., León, Z., Martínez, A., Ramírez, C.: Dynamics of the January 2013 - June 2014 explosive-effusive episode in the eruption of Volcán de Colima, México: insights from seismic and video monitoring. *Bulletin of Volcanology*, vol. 1, no. January 2013, pp. 1–13 (2015) doi: 10.1007/s00445-015-0917-z
13. Zobin, V. M., Luhr J.F., Taran, Y., Breton, M., Corte, A., de la Cruz-Reyna, S., Dominguez, T., Galindo, I., Gavilanes, J. C., Muniz, J., Navarro, C., Ramirez, J., Reyes, G. A., Ursua, M., Velasco, J., Alatorrre, E., Santiago, H.: Overview of the 1997-2000 activity of Volcan Colima Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 117, pp. 1–19 (2002)
14. Zobin, V. M., Navarro, C., Reyes-Dávila, G., Orozco, J., Bretón, M., Tellez, A., Reyes-Alfaro, G., Vázquez, H.: The methodology of quantification of volcanic explosions from broad-band seismic signals and its application to the 2004-2005 explosions at Volcán de Colima, Mexico. *Geophysical Journal International*, vol. 167, no. 1, pp. 467–478 (2006) doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03108.x
15. Zobin, V. M., Reyes, G., Guevara, E., Bretón, M.: Seismological constraints on the position of the fragmentation surfaces in the volcano conduit. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 275, no. 3-4, pp. 337–341 (2008) doi: 10.1016/j.epsl.2008.08.034
16. Zobin, V. M., Varley, N. R., González, M., Orozco, J., Reyes, G. a., Navarro, C., Bretón, M.: Monitoring the 2004 andesitic block-lava extrusion at Volcán de Colima, México from seismic activity and SO₂ emission. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 177, no. 2, pp. 367–377 (2008) doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.05.015