

## MONITOREO GEOFISICO DEL VOLCAN PACAYA

# PROYECTO MONITOREO GEOFISICO DEL VOLCAN PACAYA

DR. JUAN CARLOS VILLAGRÁN DE LEON  
M. Sc. HAROLD W. BREEDLOVE  
*Centro de Investigación y Mitigación de Desastres Naturales  
CIMDEN,  
Guatemala, Guatemala*

## RESUMEN

*Este proyecto ha tenido como objetivo desarrollar y poner en operación una infraestructura de sensores geofísicos de tipo experimental para el monitoreo de señales precursoras relacionadas con la actividad eruptiva del volcán Pacaya, con el afán de detectar señales que permitan predecir con días u horas de anticipación erupciones.*

*Se implementaron sensores para el monitoreo del gas radioactivo Radón de tipo acrílico que miden la actividad del radón en forma semanal, habiéndose obtenido una señal precursora para la erupción del 29 de febrero del año 2,000, la cual se manifestó con una semana de anticipación.*

*Se implementó una red de sensores de tipo geo-eléctrico con el objetivo de medir en forma continua potenciales eléctricos inducidos. Para efectos de esta investigación se buscaron señales que emanan del suelo días o semanas antes de las erupciones. Así como en el caso del radón, se observaron señales de tipo precursor que se manifestaron 13 días antes de la erupción del 13 de febrero. Dichas señales continuaron hasta el 18 de marzo del mismo año 2,000.*

*Se implementaron dos sensores de tipo magneto-eléctrico para determinar señales precursoras inducidas como resultado de fluctuaciones del campo magnético terrestre. Sin embargo, no se detectaron señales anómalas que se puedan asignar como precursoras o posteriores a la erupción.*

*Además se implementaron sensores geo-eléctricos y geo-magnéticos en San Lucas, Sacatepéquez, lejos del cono volcánico, para el monitoreo de señales de este tipo que puedan ser provocadas por la actividad solar, que puedan afectar los sensores instalados en el volcán Pacaya. La actividad solar es capaz de modificar los campos magnéticos terrestres, induciendo voltajes directamente detectables por los sensores magnéticos, potenciales eléctricos inducidos por las variaciones de campo magnético. En este sentido la estación de San Lucas es considerada como la estación de referencia y control para la estación instalada en El Patrocimo en las faldas del volcán Pacaya.*

*En este artículo se presenta una descripción técnica de los equipos implementados y las hipótesis en las cuales se basa su implementación, los resultados obtenidos a la fecha y conclusiones con relación a este tipo de monitoreo geofísico*

## INTRODUCCION

El volcán Pacaya es un volcán activo situado en el municipio de Amatitlán, a 35 kilómetros al sur de la ciudad de Guatemala. Es un volcán de tipo estromboliano y tiene una altura de 2,500 metros sobre el nivel del mar. Hasta 1,961 el volcán había estado inactivo. Sin embargo, en ese año empezó su ciclo más reciente de actividad, que ha durado más de 4 décadas. Dado que en sus faldas se sitúan varias comunidades que se encuentran en riesgo, se hace necesario mantener una vigilancia de su actividad para caracterizarlo y posteriormente alertar a la población en caso de erupciones.

## MONITOREO GEOFISICO DEL VOLCAN PACAYA

Científicos de varios países [1-10] han llevado a cabo mediciones de la actividad del radón con relación a erupciones volcánicas y sismos, reportando en muchos casos la existencia de señales tanto precursoras, como posteriores a estos eventos. El radón es un gas de tipo radioactivo que emana de las rocas que poseen uranio y otros minerales pesados. Tiene la peculiaridad de ser un gas noble, con una vida media de casi cuatro días. Como gas, se difunde a través de las grietas y microgrietas y así llega desde las rocas debajo de la superficie hasta la superficie. En 1996 los autores llevaron a cabo con el apoyo de CONRED una serie de mediciones de radón en las faldas del volcán Pacaya, que pusieron de manifiesto su posible aplicación como una técnica para la predicción de erupciones.

Por otra parte, desde hace más de una década se está desarrollando la medición de variaciones en los campos electromagnéticos con el afán de estudiar el surgimiento de señales precursoras como resultado de fenómenos en los cuáles las variaciones en la presión en las rocas inducen variaciones en los campos electromagnéticos terrestres. Científicos de varios países Europeos [11-15], en especial de Grecia y de la antigua Unión Soviética, han desarrollado metodologías para tratar de detectar estas señales precursoras electromagnéticas. En principio, estas señales precursoras se generan como resultado del efecto piezoeléctrico o alguno similar que experimentan algunos tipos de rocas. Esto ha sido verificado experimentalmente con muestras de rocas de granito y de otros minerales en Grecia [16].

### OBJETIVOS

El proyecto ha tenido como objetivos los siguientes:

- *el desarrollo de una infraestructura de sensores geofísicos que detecten actividades pre-eruptivas de tipo nuclear (gas radón), electro-telúricos y magneto-telúricos*
- *Montar dicha infraestructura y monitorear la actividad recabada por cada tipo de sensor para tratar de desarrollar modelos integrados que permitan evaluar la aplicabilidad de dichos sensores en la detectabilidad de señales precursoras a erupciones.*

### HIPOTESIS

#### MONITOREO DE LA ACTIVIDAD DEL RADON:

Para el caso de erupciones volcánicas, la hipótesis que se plantea es la siguiente:

*conforme la presión magmática aumenta en la región del cono volcánico, se desencadenan series de microtemblores y microfisuras. Estas fisuras a su vez liberan hacia la superficie cantidades mayores radón. De ahí que conforme se presente una actividad eruptiva, se detecte mayores cantidades de radón de las que se detecta normalmente*

Es de esperarse que la concentración de radón a ser detectada pueda ser correlacionada con la magnitud de la actividad volcánica en base a la presión que ejerce el magma ascendente. R. García, G. Natale, M. Monnin y J. L. Seidel han desarrollado recientemente un modelo geofísico que describe como se

## MONITOREO GEOFISICO DEL VOLCAN PACAYA

pueden producir anomalías en las emisiones de radón como resultado de una perturbación producida por el ascenso de magma [17]. Aunque el modelo predice anomalías, los múltiples factores presentes en el modelo y la imposibilidad actual de medir la presión magmática de la lava conforme asciende hacen imposible una comprobación cuantitativa del modelo, por lo cual se ha enfocado una comprobación de carácter cualitativo en este caso

### SEÑALES ELECTRO-TELÚRICAS

Desde hace dos décadas, científicos del departamento de física de la Universidad de Atenas en Grecia han estado detectando potenciales eléctricos inducidos precursores a sismos de carácter electro-telúrico<sup>1</sup>. Aunque no existe una teoría formal acerca de la creación de dichas señales, experimentos de laboratorio en muestras de rocas indican que conforme varía la presión aplicada a una roca, la misma exhibe un potencial inducido en sus extremos. Los experimentos muestran que el voltaje inducido en las rocas se puede correlacionar linealmente con la variación temporal de presión que experimenta la roca [16].

Experimentos similares llevados a cabo por los autores en las cercanías de la falla del Motagua han indicado la presencia de señales de este tipo previo a la actividad sísmica. En el caso de este proyecto, se presenta la siguiente hipótesis:

*conforme asciende el magma a la superficie, se generan enormes variaciones en las presiones que experimentan las rocas que componen el cono. El magma ascendente produce fracturas y derretimiento de rocas, lo cual puede generar potenciales inducidos capaces de ser detectados en las cercanías del cono.*

### SEÑALES MAGNETICAS:

Con el objetivo de ampliar las técnicas usadas para la detección de señales precursoras, se concibió la instalación de sensores magnéticos para el monitoreo de variaciones en el campo magnético terrestre. En este caso la hipótesis se basa en el ferromagnetismo de la lava que contiene minerales de hierro. La lava ascendente podría ser capaz de modificar en forma mínima, pero apreciable, el campo magnético terrestre en las cercanías del cono

Desde un punto de vista conceptual, la ley de inducción magnética de Faraday expresa que una variación en el campo magnético es capaz de inducir un voltaje en un conductor. En este caso el voltaje magnético inducido se expresa de la siguiente manera:

$$V_{in} = K (dB/dt) NA$$

Donde el término entre paréntesis indica la variación en el campo magnético con respecto al tiempo, la cual se asociaría a la columna ascendente de magma. K es un factor relacionado con la inductancia magnética de la bobina y está relacionado con el material del cual está hecho el núcleo; el factor N el

---

<sup>1</sup> Se le conoce como técnica VAN en honor a sus autores, Varotsos, Alexopoulos y Nomicos.

## MONITOREO GEOFISICO DEL VOLCAN PACAYA

número de vueltas de la bobina y el factor A el área que abarca cada vuelta de la bobina. Sin embargo, es importante notar que los autores de la técnica VAN indican que no deben existir señales precursoras de carácter magnético asociadas a la actividad telúrica.

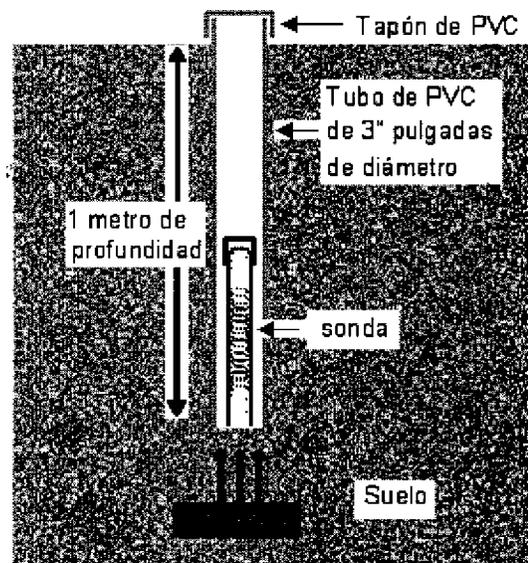
### METODOLOGIA

#### RADON:

En el caso del radón se inició el monitoreo utilizando películas acrílicas tipo LR115, manufactureras en Francia por Kodak-Patie. La Película se coloca en la parte superior de una sonda de PVC que contiene material duroport en suspensión para remover vapor de agua (humedad).

Para esta aplicación en la cual se mide la actividad del radón para correlacionarla con actividad volcánica, la sonda se inserta en un tubo de PVC de un metro de longitud que está enterrado en el suelo, como se indica en la figura 1. La sonda se posiciona a un metro de profundidad para minimizar los efectos atmosféricos, tales como la lluvia, las variaciones de temperatura y de humedad relativa, que en un momento dado pueden afectar las concentraciones del gas radón presente.

Figura 1: Esquema del posicionamiento de la sonda para la medición de radón en el suelo.



#### TECNICA PARA DETECCIÓN DE POTENCIALES INDUCIDOS

En el caso de esta técnica se hace un monitoreo de los potenciales eléctricos inducidos que emanan del suelo en forma permanente. En este se construyen electrodos de plomo inmersos en una matriz de barro húmedo y sal, los cuales se entierran a un metro de profundidad. Por lo general se entierran de 5 a 7 electrodos en el suelo o en las rocas y se miden las diferencias de voltajes entre pares de electrodos.

En la siguiente figura se muestra el esquema del procesamiento de las señales de entrada.

## MONITOREO GEOFISICO DEL VOLCAN PACAYA

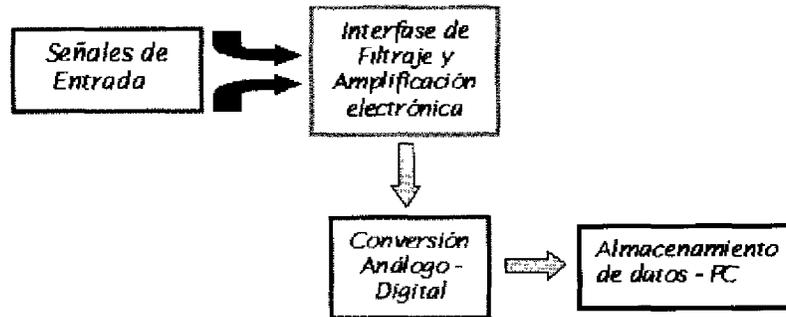


Figura 2: Esquema del procesamiento y almacenamiento de los datos provenientes de los electrodos y sensores magnéticos. En el sistema actual se hace una captura de datos de 6 canales cada 30 segundos. En un día se generan 2,880 datos por cada canal.

La interfase de filtraje y amplificación consta de una fuente de poder y tarjetas electrónicas manufacturadas localmente. Las tarjetas electrónicas procesan las señales análogas procedentes de los electrodos utilizando para el filtraje de bajas frecuencias filtros tipo Butterworth y amplificadores operacionales en serie. La figura # 3 muestra el esquema del procesamiento de señales análogas.

Posteriormente, se unen las dos señales ya filtradas provenientes de los electrodos en un comparador diferencial, que permite obtener la diferencia de voltaje entre ambos electrodos. El grado de amplificación es seleccionable, lográndose amplificaciones de magnitud 1, 5, 10 y 25.

Cada tarjeta de la interfase se calibra antes de ser instalada en la interfase y cuenta con circuitos de protección contra picos de voltaje inducidos por descargas eléctricas y otros fenómenos.

### ESQUEMA DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES ANALOGAS

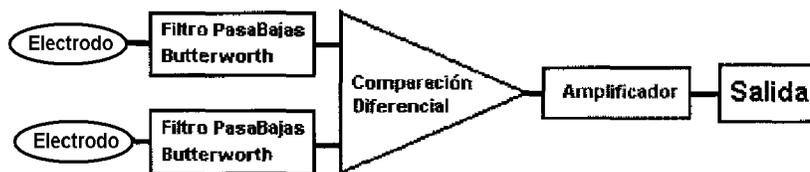


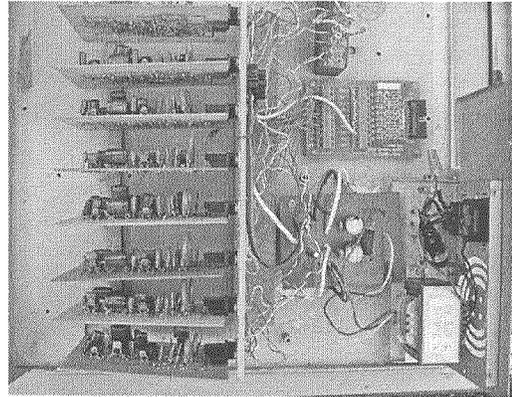
Figura 3: Esquema del procesamiento de las señales análogas procedentes de los electrodos.

Una vez completadas estas etapas de filtraje y amplificación se transforman los voltajes de un formato análogo a uno digital mediante el uso de tarjetas de conversión análogo/digital y posteriormente se almacenan en el disco duro de la PC. Para este proyecto se han utilizado tarjetas marca Advantech modelo PCL-711S, con capacidad para 8 canales de conversión y resolución de 12 bits. Para este proyecto se construyeron 3 sistemas de adquisición de datos.

## MONITOREO GEOFISICO DEL VOLCAN PACAYA

La siguiente foto muestra una interfase y sus tarjetas de procesamiento de señales análogas. El montaje se hace en un chasis de PC.

Foto # 1: Interfase para procesamiento de señales análogas. A la izquierda 8 tarjetas electrónicas de filtraje y amplificación. A la derecha abajo la fuente de poder. El conector verde permite el acople con la tarjeta análogo/digital instalada en la PC.



### SEÑALES MAGNETICAS

En el caso del monitoreo de señales magnéticas se han construido bobinas para la medición de voltajes inducidos que se generan como resultado de fluctuaciones en el campo magnético terrestre. Las bobinas constan de 50,000 vueltas y se han ensamblado usando como núcleos varillas de hierro dulce de 0.5 pulgadas de diámetro. Por lo general se entierran dos o tres sensores magnéticos a una profundidad de un metro. En el caso más simple, se posiciona una bobina en dirección vertical, otra orientada en dirección Norte/Sur y la tercera en dirección Este/Oeste.

Dada la estructura funcional de las bobinas, estas detectarán señales en la medida en la cual varíen los campos magnéticos presentes. Por tal motivo se sigue un procedimiento muy similar al descrito en el caso de las señales eléctricas para su adquisición, es decir, se filtran, amplifican y posteriormente se almacenan en la PC.

### INSTALACION DE SISTEMAS DE MONITOREO

Una vez construidos los sistemas de monitoreo, se procedió a su instalación entre enero y junio del año 2,000. El mapa 1 muestra la ubicación de las distintas estaciones en relación al cono activo del volcán Pacaya.

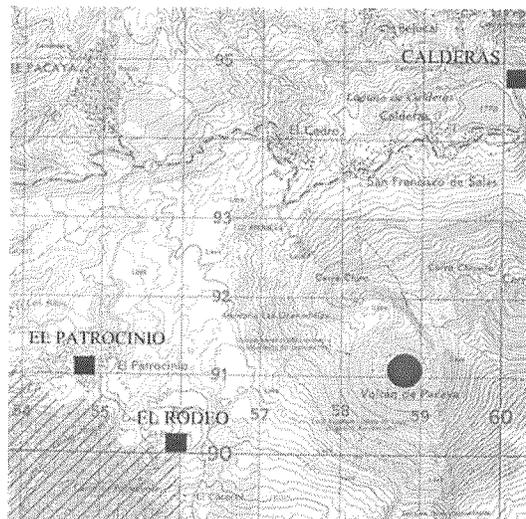
#### ***RADON:***

La primera estación de monitoreo de radón se instaló en El Patrocinio el 21 de enero del año 2,000 y se mantuvo el monitoreo durante 9 semanas. La segunda sonda de radón se instaló en El Rodeo el 23 de enero del año 2,000 y se mantuvo operando durante 4 semanas hasta que la sonda fue hurtada.

## MONITOREO GEOFISICO DEL VOLCAN PACAYA

La selección de estos sitios para el posicionamiento de sondas obedece a la tendencia que muestra el volcán de desplazar su cono gradualmente en dirección hacia El Rodeo a lo largo de muchos años. Además, el suelo tiende a ser más poroso, por lo cual se espera apreciar en mejor forma el asenso de un flujo de radón.

Mapa # 1: Región de las faldas del volcán Pacaya. Fuente: Mapa Cartográfico Hoja Amatitlán, Escala 1:50,000. Instituto Geográfico Nacional, IGN.



## SENSORES GEOELÉCTRICO Y GEOMAGNETICOS

### ESTACION EL PATROCINIO

La primera estación se instaló en El Patrocinio. La instalación se llevó a cabo en enero del 2,000. Dado que el sistema de procesamiento y adquisición de datos cuenta con 6 canales, se hizo la siguiente distribución. 2 canales para detectar señales magneto-telúricas, un canal para señales de audio y tres canales para señales electro-telúricas.

### ESTACION SAN LUCAS SACATEPEQUEZ

La estación en San Lucas Sacatepéquez es la que sirve de control para señales magnéticas. La estación San Lucas ayuda en la discriminación de señales magnéticas que puedan ser generadas por actividad solar o por actividad no relacionada con la actividad volcánica. Dado que la actividad solar tiende a modificar los campos magnéticos terrestres, induce variaciones directas en las bobinas. En forma paralela, la variación en los campos magnéticos terrestres induce campos eléctricos que generan potenciales eléctricos, los cuales pueden ser detectados por los sensores electro-telúricos. Por tal motivo se seleccionó un sitio de control alejado del volcán y sus influencias.

Esta estación cuenta con tres sensores magnéticos y 5 electro-telúricos. Dado que el sistema de procesamiento y adquisición de datos cuenta con 6 canales, se hizo la siguiente distribución para esta estación: 2 canales para señales magneto-telúricas y 4 canales para señales electro-telúricas.