



DIRECCION DE PLANIFICACION ELECTRICA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

BOLETIN DEL OBSERVATORIO VULCANOLOGICO DEL ARENAL



AÑO 1, No. 2, DICIEMBRE 1988

SAN JOSE, COSTA RICA

Bomba volcánica eruptada por el volcán Arenal en julio de 1968. Al fondo se observa el campo de coladas de lava entre los años 1970 - 1972. Fotografía procedente de los archivos del I.C.E.

DIRECCION PLANIFICACION ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

BOLETIN DEL OBSERVATORIO
VULCANOLOGICO DEL ARENAL

INDICE

ARTICULOS

Luis Diego Morales, Javier F. Soley, Guillermo E. Alvarado, Andrea Borgia y Gerardo Soto.	
Análisis espectral de algunas señales sísmicas y su relación con la actividad de los volcanes Arenal y Poás, Costa Rica.....	1
Guillermo E. Alvarado, Samuel Argüeta y Carlos Cordero Interpretación preliminar de las deformaciones asociadas al volcán Arenal (Costa Rica).....	26
Carlos E. Leandro y Guillermo E. Alvarado	
Influencia de las mareas Lunisolares sobre el comportamiento del volcán Arenal, Costa Rica.....	44
Guillermo E. Alvarado, Rafael Barquero, Gerardo Soto y Grace Hidalgo	
Referencias bibliográficas principales sobre el volcán Arenal y áreas vecinas	57
Rafael Barquero	
Resumen de la actividad del volcán Arenal durante el periodo 1987-1988	68

I

OBSERVATORIO VULCANOLOGICO ARENAL (O V A)
Sección de Sismología e Ing. Sísmica
Dpto. de Geología
Instituto Costarricense de Electricidad
Apdo. 10032 - SAN JOSE COSTA RICA

Teléfonos

(506) 20-7468
(506) 20-7741

Telex (376) 2140

Fax (506) 22-38-71

El Observatorio Vulcanológico Arenal (OVA) es parte de la Sección de Sismología e Ing. Sísmica del Dpto. de Geología del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), la cual conjuntamente con la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología constituyen la RED SISMOLOGICA NACIONAL (RSN ICE-UCR)

Coordinador Geol. Guillermo Alvarado

Personal profesional del ICE

- Geol. Guillermo Alvarado, Geovulcanología y Neotectónica
- Geol. Rafael Barquero, Sismología
- Ing. Carlos Cordero, Topografía.
- Geol. Carlos Leandro, Gravimetría y Magnetometría
- Ing. Jose Miguel Barrantes, Electrónica
- Lic. Jose Francisco Fernández, Químico
- Ing. Samuel Argueta, Topografía

Personal técnico y de apoyo

- Milton Corrales
- Guido Calvo
- Francisco Arias

II

Equipo y técnicas de auscultación

Estaciones sismograficas telemetricas permanentes

Estación	Código	Lat	Long	Elevac	Dist	Volcán
FORTUNA	FDR	10°25 00'	84°41 52'	500 m	04 0 km al E	
CHIRIPA	AR6	10°26 38'	84°54 63'	1020 m	22 2 km al W	

Estaciones sismográficas portatiles MQ-800, seis

Red de nueve inclinómetros secos instalados en forma radial alrededor del volcán

Laboratorio Químico

Distanciómetro electrónico (EDM)

Red de diez estaciones para muestreo Geoquímico de Fuentes termales y frias

Red de hitos para medidas gravimétricas y otras técnicas geofísicas

Periódicamente se realizan visitas de observación para conocer la dinamica del volcán y detectar cualquier situación anormal

III

OBSERVATORIO VULCANOLOGICO ARENAL (O.V.A.)
Sección de Sismología e Ing. Sísmica
Dpto. de Geología
Instituto Costarricense de Electricidad
Apdo. 10032 - SAN JOSE, COSTA RICA

Telephones.

(506) 20-7468
(506) 20-7741

Telex: (376) 2140

Fax (506) 33-38-71

The Observatorio Vulcanológico Arenal (OVA) is part of the Section of Seismology and Seismic Eng. of the Dept. of Geology of the Costa Rican Institute of Electricity which, together with the Section of Seismology, Volcanology and Geophysic Exploration of the Centroamerican School of Geology constitute the National SEISMOLOGICAL NETWORK (RSN. ICE-UCR).

Coordinator Geól. Guillermo Alvarado

Professional staff of ICE

- Geol. Guillermo Alvarado, Geovolcanology and Neotectonics
- Geol. Rafael Barquero, Seismology
- Eng. Carlos Cordero, Topography.
- Geól. Carlos Leandro, Gravimetry and Magnetometry
- Eng. José Miguel Barrantes, Electronics
- Lic. José Francisco Fernández, Chemistry
- Ing. Samuel Argueta, Topography

Technical and auxiliary staff

- Milton Corrales
- Guido Calvo
- Francisco Arias

IV

Equipment and monitoring technics

Permanent telemetric seismographic stations.

Station	Code	Lat	Long.	Elevat	Dist.	Volcano
FORTUNA	FDR	10°28.00'	84°41.52'	500 m	04.0 Km	E
CHIRIPA	AR6	10°26.38'	84°54.63'	1020 m	22.2 Km	W

Portable seismographic stations MQ-800, six

Nine dry-tilt stations located radially around the volcano.
Chemistry laboratory

Electronic Distance Meter (EDM).

Ten station network for Geochemical monitoring of cool and hot springs.

Stations for gravimetric and magnetometric measurements.

Field observations are carried out periodically in order to know about the volcano dynamics and to detect any abnormal phenomena.

ANALISIS ESPECTRAL DE ALGUNAS SEÑALES SISMICAS DE LOS VOLCANES ARENAL Y POAS (COSTA RICA) Y SU RELACION CON LA ACTIVIDAD ERUPTIVA

Luis D. Morales*, Javier F. Soley**, Guillermo Alvarado***, Andrea Borgia****, Gerardo Soto*****

RESUMEN

La técnica del análisis espectral es aplicada a varias señales sísmicas generadas por la actividad volcánica del Arenal y del Poás durante el período de julio 1984 a junio 1988. Las frecuencias dominantes en los diferentes espectros obtenidos, tanto para fases explosivas como de efusión, muestran una moda en la frecuencia cercana a 2 Hz, con un rango de frecuencias entre 1 y 4 Hz. Las señales predominantes en el Poás son eventos de baja frecuencia, con una moda en la frecuencia dominante cercana a los 1,7 Hz y un rango entre 0,35 y 2,25 Hz. La cercana coincidencia en la moda de las frecuencias fundamentales para las señales de ambos volcanes, sugiere en parte un proceso físico similar donde la desgasificación es la fuente mecánica común, correspondiendo con una fuente sísmica muy superficial, que en el caso de ambos volcanes parece ser menor a los 500 m de profundidad, hasta prácticamente cero.

ABSTRACT

The spectral analysis technics are applied to several seismic signals generated by the activity of Arenal and Poas Volcanoes from July 1984 to June 1988. The dominant frequencies on the different velocity spectra for explosive or effusive phases at Arenal Volcano, has a frequency mode near 2 Hz, and all the high-amplitude peaks occur between 1 and 4 Hz. Low frequency events are the most important seismic signal at Poas Volcano with a frequency mode near 1,7 Hz, and all the high-amplitude peaks occur between 0,35 and 2,25 Hz. The closely related frequency mode range for the velocity spectra response in the signals from both volcanoes, suggest a similar physical process, where degassing is the common source mechanism, in connection with a very shallow seismic source, less than a depth of 500 m, for these volcanoes.

-
- * Escuela Centroamericana de Geología y Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica (U.C.R.), Apdo. 35.
 - ** Centro de Investigaciones Geofísicas y Escuela de Física, U.C.R.
 - *** Sección de Sismología e Ingeniería Sísmica, Departamento de Geología, ICE, Apdo. 10032.
 - **** Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California 91109.
 - ***** Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, Apdo. 35.

INTRODUCCION

Un sistema sismográfico transportable y su equipo complementario para el análisis específico de los datos (donación del gobierno japonés, JICA), fue utilizado a partir de julio de 1984 en las visitas para obtención de datos sísmicos en los aparatos volcánicos del Arenal y Poás (Fig. 1), cuya permanente actividad genera señales sísmicas que de ser convenientemente registradas, permiten obtener sus correspondientes "espectros de potencia", al aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT).

El análisis espectral permite una clasificación más precisa de las señales sísmicas y una mejor interpretación de la fuente sísmica o del proceso que les ha dado origen, así como los efectos del medio, según lo propuesto por varios autores (Schick & Riuscetti, 1973; Aki et al, 1977; Riuscetti et al, 1977; Schick, 1981; Seidl et al, 1981; Chouet, 1981, 1985; McNutt, 1986). Nosotros exponemos aquí los primeros resultados sobre la relación entre las frecuencias espectrales obtenidas y las señales sísmicas relacionadas con la actividad volcánica en el Arenal y el Poás. En el apéndice se presentan algunas señales sísmicas analizadas y sus correspondientes espectros de potencia.

INSTRUMENTACION Y METODO DE ANALISIS

Las señales son registradas y grabadas en cintas magnéticas (cassettes) con un sistema sismográfico de tres componentes (N-S; E-W, Z: para la velocidad del suelo), colocado temporalmente varias horas al día, en sitios cercanos al volcán. En el caso del Arenal, usamos preferentemente la caseta del inclinómetro seco C, aproximadamente 2 km al oeste del cráter activo, y en el Poás, en las cercanías del mirador, en el borde sur del cráter, a menos de 1 km del foco de actividad volcánica. (Figuras 1 y 2).

La señal se digitaliza y analiza con la ayuda de una computadora PS-TEAC 85 equipada con un convertidor analógico a digital, impresora, graficador y dos unidades de diskettes. El fabricante del equipo de observación proporciona los programas necesarios para digitalizar, editar, obtener las transformadas de discretas de Fourier y para imprimir en forma permanente los datos y los resultados de los análisis.

La respuesta instrumental es de 1 Hz para los sismómetros y una respuesta casi plana del sistema sismográfico desde 1 Hz hasta 70 Hz.

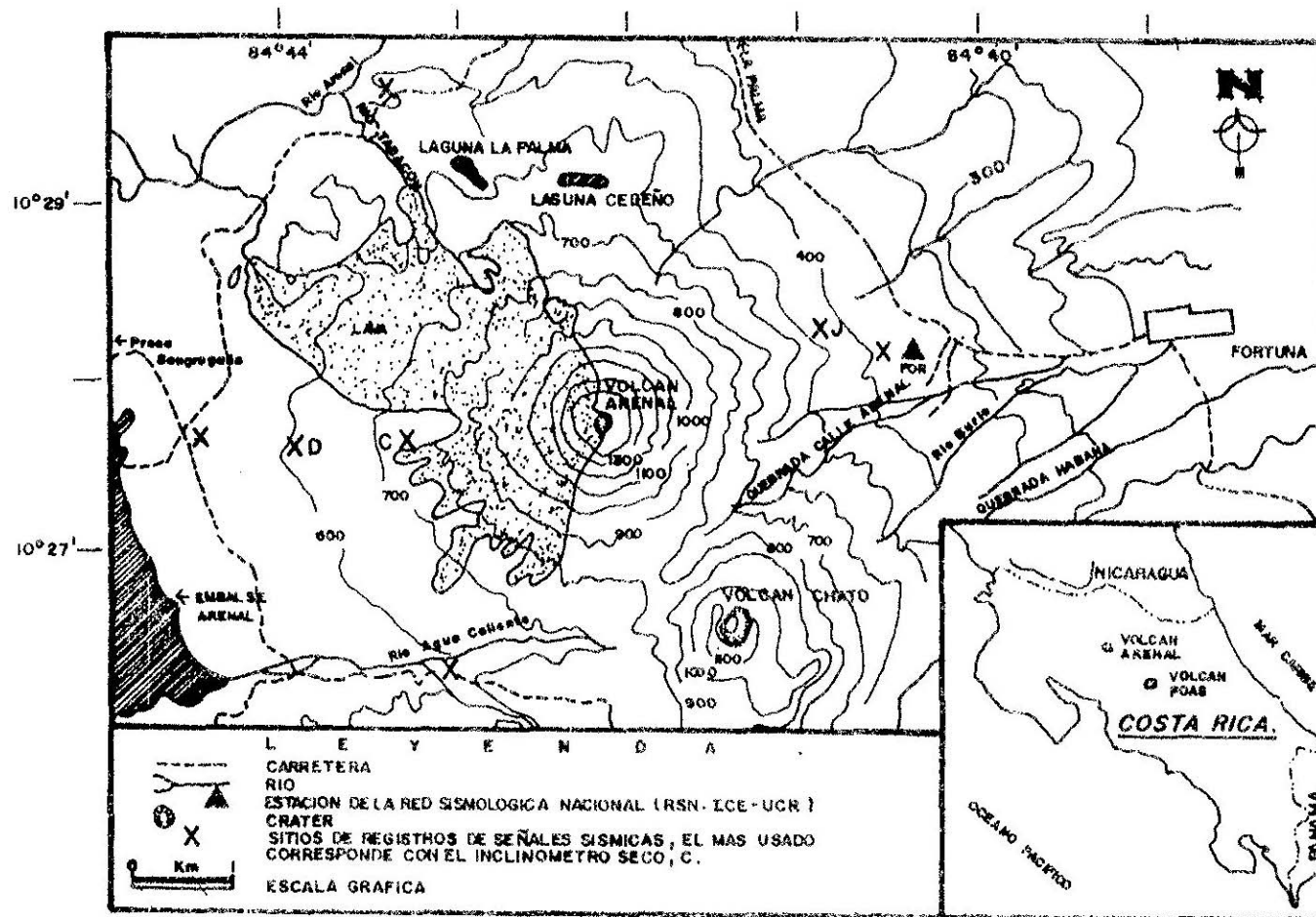


FIG. 1

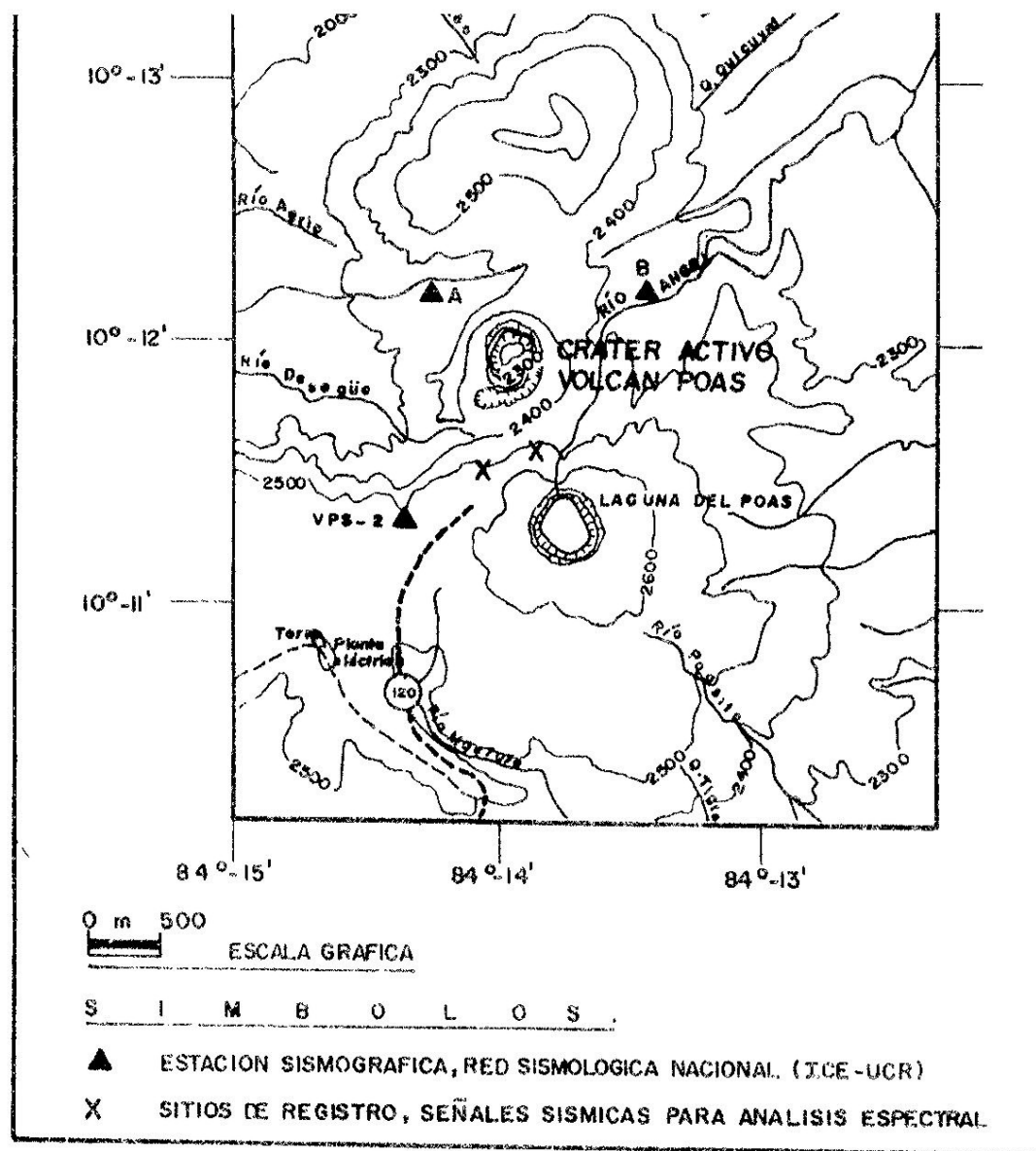


FIG. 2

Los pasos típicos seguidos en el análisis de los datos son:

1. Selección del evento de interés.
2. Digitalización y calibración de las señales
3. Corrección de tendencias lineales
4. Cálculo de la función de autocorrelación.
5. Cálculo del espectro de potencia.
6. Integración del espectro de potencia.

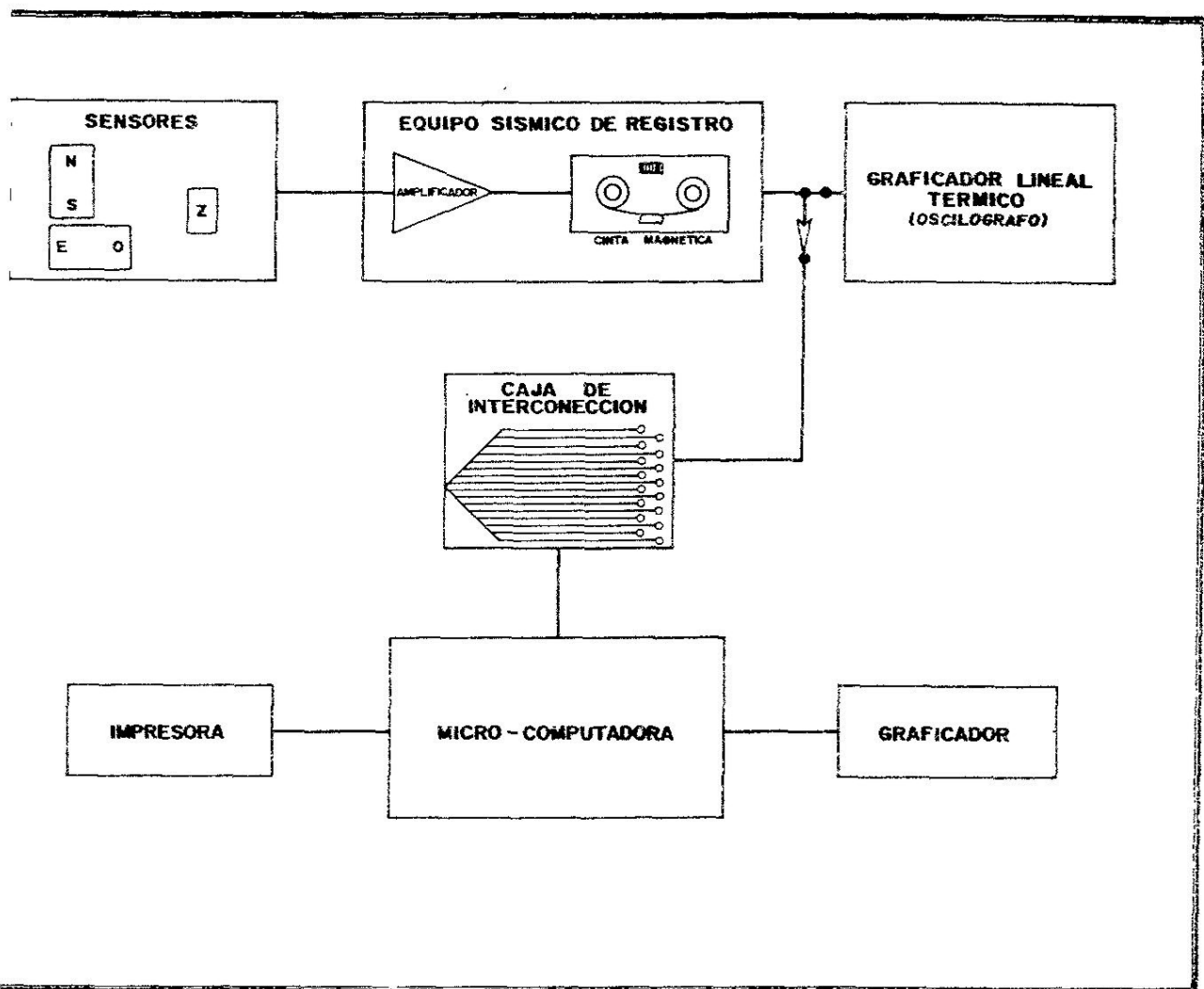
La figura 3, ilustra la configuración del sistema sismográfico y del so de análisis.

SEÑALES SÍSMICAS Y LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESPECTRAL

a. Volcán Arenal

Las señales sísmicas generadas por la actividad del volcán Arenal han sido iadas por diferentes autores (Minakami et al, 1969; Matumoto, 1976; Montero, Alvarado y Barquero, 1987; Alvarado et al, 1988), pero es este el primer jo en considerar el análisis espectral de las señales más características adas durante el período de obtención de datos sísmicos entre julio de 1984 y ro de 1988, lapso durante el cual el Arenal ha mostrado una fase mboliana predominantemente explosiva, acompañada de pequeñas nubes ntes, coladas de lava y derrumbes de bloques. En otras ocasiones la idad adquiere un carácter efusivo, con derrames de lava, y derrumbes o nchas de detritos lávicos (Alvarado y Barquero, 1988).

Utilizaremos como referencia para las señales sísmicas del Arenal, la ficación propuesta por Alvarado y Barquero (1987), por la claridad enológica y de síntesis que presenta. Cuando la actividad del volcán es de ter explosivo (foco somero inferior a los 100 metros), predominan dichos os (E), que pueden estar seguidos por una cola de tremores de alta, media o frecuencia (E_H , E_I , E_L) con una duración de 1 o más minutos como resultado a vibración y de la erupción misma, de los materiales eyectados o aquellos en un reposo inestable pueden originar derrumbes o avalanchas, y la señal que tramos es un tremor de alta a mediana frecuencia (T_D). En otras ocasiones resenta una desgasificación violenta con o sin erupción, produciendo un ruido de un gran fuelle, y entonces la señal sísmica más característica es un



tremor de baja frecuencia ($T_I = T_G$) con apariencia de pulsaciones o de una señal modulada.

Cuando la actividad es de carácter efusivo y el conducto volcánico está lleno, se genera un ruido sísmico de fondo con varias horas de duración, amplitud y frecuencia casi constante (1,4 Hz), tal vez asociado a oscilaciones o resonancia en la cámara o el conducto volcánico, o al bombeo de magma (véase Arana y Ortiz, 1984). Si la lava llega a derramarse, se originan derrumbes (T_D) cuya señal corresponde con un característico ruido sísmico de alta frecuencia (> 3 Hz).

En el cuadro 1 se presenta la actividad volcánica o la señal sísmica generada y las respuestas espectrales, graficando la frecuencia fundamental del espectro, obtenida en las diferentes componentes de la velocidad del movimiento del suelo (N-S; E-W; Z). En general, la componente Z tiene frecuencias más altas que las componentes horizontales, siendo la base del espectro, de banda más angosta en las horizontales que en la vertical, así como encontramos también más energía en las componentes horizontales que en la vertical. Del análisis de estos datos encontramos que la moda de la frecuencia fundamental es cercana a $2,0 \pm 0,5$ Hz., y las frecuencias espectrales obtenidas para las diferentes señales sísmicas procesadas, con un rango entre 1 y 3 Hz, corresponden con los tremores intermedios (T_I , E_I , T_G) de la clasificación propuesta por Alvarado y Barquero, (1987). Los espectros de las señales sísmicas asociadas con la caída de bloques, desprendimientos de rocas o derrumbes, tienen sus respuesta de frecuencia dominante entre 3 y 4 Hz en correspondencia con los tremores $T_H = T_D$ de Alvarado y Barquero (1987). Sin embargo, los espectros de estas últimas señales tienen una base ancha y en algunos casos, alcanzan frecuencias secundarias de hasta 10 ó 15 Hz.

Los espectros sísmicos, obtenidos en los diferentes sitios de registro con una cobertura azimutal (Fig. 1), muestran varios picos espectrales angostos, con una banda de frecuencias similares, por lo que no parece existir una dependencia con la trayectoria de propagación de la señal sísmica o con los efectos del sitio de registro, por lo cual pueden ser debidos a efectos de la fuente, como ha sido sugerido por otros autores (Aki, 1988; Ferrazzini y Aki, 1988).

tremor de baja frecuencia ($T_I = T_G$) con apariencia de pulsaciones o de una señal modulada.

Cuando la actividad es de carácter efusivo y el conducto volcánico está lleno, se genera un ruido sísmico de fondo con varias horas de duración, amplitud y frecuencia casi constante (1,4 Hz), tal vez asociado a oscilaciones o resonancia en la cámara o el conducto volcánico, o al bombeo de magma (véase Arana y Ortiz, 1984). Si la lava llega a derramarse, se originan derrumbes (T_D) cuya señal corresponde con un característico ruido sísmico de alta frecuencia (> 3 Hz).

En el cuadro 1 se presenta la actividad volcánica o la señal sísmica generada y las respuestas espectrales, graficando la frecuencia fundamental del espectro, obtenida en las diferentes componentes de la velocidad del movimiento del suelo (N-S; E-W; Z). En general, la componente Z tiene frecuencias más altas que las componentes horizontales, siendo la base del espectro, de banda más angosta en las horizontales que en la vertical, así como encontramos también más energía en las componentes horizontales que en la vertical. Del análisis de estos datos encontramos que la moda de la frecuencia fundamental es cercana a $2,0 \pm 0,5$ Hz., y las frecuencias espectrales obtenidas para las diferentes señales sísmicas procesadas, con un rango entre 1 y 3 Hz, corresponden con los tremores intermedios (T_I , E_I , T_G) de la clasificación propuesta por Alvarado y Barquero, (1987). Los espectros de las señales sísmicas asociadas con la caída de bloques, desprendimientos de rocas o derrumbes, tienen sus respuesta de frecuencia dominante entre 3 y 4 Hz en correspondencia con los tremores $T_H = T_D$ de Alvarado y Barquero (1987). Sin embargo, los espectros de estas últimas señales tienen una base ancha y en algunos casos, alcanzan frecuencias secundarias de hasta 10 ó 15 Hz.

Los espectros sísmicos, obtenidos en los diferentes sitios de registro con una cobertura azimutal (Fig. 1), muestran varios picos espectrales angostos, con una banda de frecuencias similares, por lo que no parece existir una dependencia con la trayectoria de propagación de la señal sísmica o con los efectos del sitio de registro, por lo cual pueden ser debidos a efectos de la fuente, como ha sido sugerido por otros autores (Aki, 1988; Ferrazzini y Aki, 1988).

b. Volcán Poás

Desde su último período eruptivo en 1953-1954 con fases explosivas y la extrusión del domo, el volcán Poás se ha mantenido con actividad fumarólica y con esporádicas y pequeñas erupciones freáticas geyseriformes (Casertano et al, 1983). A partir de junio 1987, vuelven a presentarse las erupciones con penachos de barro en la laguna caliente, en la cual ha ido descendiendo notoriamente el nivel del agua (aproximadamente 30 m, a partir de enero de 1985), y con una temperatura actual cercana al punto de ebullición y extremadamente ácida (pH=0).

Durante doce años de observación sismográfica en la cima del Poás, Fig.2 (VPS estación permanente, Universidad de Costa Rica, posteriormente VPS-2, Red Sismológica Nacional ICE-UCR; y recientemente A, B, estaciones portátiles (ICE-UCR), las señales sísmicas registradas más características son las siguientes:

1. Eventos volcano-tectónicos, tipo A (Minakami, 1969): $f > 10$ Hz
2. Eventos volcánicos de baja frecuencia, tipo B (Minakami, 1969): y explosiones $1 < f \leq 5$ Hz.
3. Trémores de carácter armónico, $1 < f \leq 5$ Hz
4. Eventos pequeños impulsivo-explosivo (rockburst), (Casertano et al ,1983): $f > 10$ Hz.
5. Trémores de alta frecuencia, $f > 5$ Hz.

Los eventos volcánicos de baja frecuencia, muchos de ellos con un marcado carácter dispersivo, probablemente fases de ondas Rayleigh (McNutt, 1986) han sido los más característicos sobre todo después de que el domo alcanzó temperaturas próximas a los 960°C a principios del año 1981. El rápido crecimiento de la temperatura estuvo precedido por un enjambre de temblores (tipo A) a finales de julio 1980 (Casertano et al, 1985). Durante noviembre-diciembre 1980, con un arreglo sismográfico de tres estaciones portátiles en el cráter del Poás, Morales y Borgia lograron localizar instrumentalmente los primeros temblores volcano-tectónicos en la cima del Poás, con un rango de profundidades entre 0 y 20 km ($0 \leq h < 20$).

El incremento de la temperatura provocó un aumento en la presión y en la velocidad del flujo de vapor en la parte superior del conducto volcánico, generando un ruido ensordecedor (tipo jet) al escapar por las fumarolas, y dando origen a los trémores armónicos que se constituyen en el carácter relevante de la actividad, pero fueron disminuyendo en duración y amplitud con el paso del tiempo

hasta casi desaparecer a finales del año 1985, y al mismo tiempo fueron aumentando los eventos de baja frecuencia hasta alcanzar en 1987 y sobre todo en 1988, cantidades de miles por mes, correspondiendo a febrero 1989 el máximo con un promedio de 310 eventos por día, en comparación con 229 eventos por día en el mes de marzo de este mismo año (Figura 4 y 5).

La relación entre los trémores y los eventos de baja frecuencia, que son las señales para las cuales tenemos resultados espectrales (Cuadro 1), poseen un rango de variación entre 0,3 y 4 Hz, con una frecuencia dominante cercana a 1,7 Hz, la cual coincide en general con los resultados de Seidl et al (1981), McNutt (1986), Ferrazzini y Aki (1988), quienes muestran señales sísmicas de los volcanes Etna, Pavlof y Kilauea respectivamente, con espectros similares para eventos de baja frecuencia y trémores como los del Poás. Aún más, McNutt (1986) demuestra que las explosiones y los eventos tipo B están cercanamente relacionados y ambos tienen varias características que comparten con los trémores; lo cual concuerda con la propuesta de Aki (1984), de que los trémores volcánicos son causados por la ocurrencia sostenida de eventos de baja frecuencia. Lo anterior sugiere una relación directa con un mismo proceso, la desgasificación a través de la parte superior del conducto volcánico, en una fuente muy superficial, que con base en el modelo de Casertano et al. (1987) sobre la pila volcánica, podría tener su origen en el mismo nivel donde ocurren las erupciones freáticas (50-150 m); o bien, de acuerdo al modelo gravimétrico de Ymer et al. (1987) sobre los cambios de densidad del magma debido a la continua resolidificación y desgasificación en la columna magmática, con una interfase sólida parcialmente fundida, a profundidades de 500 m o menos. Dentro de estas condiciones, un mecanismo que podría generar la señal de baja frecuencia (tipo B) en el Poás, sería la interacción del magma con el agua subterránea cerca de la superficie, en donde la causa sería el repentino pulso o golpe como resultado del cambio del agua subterránea en vapor, a consecuencia de la intrusión del magma en las capas freáticas inferiores. Tal mecanismo ha sido considerado o sugerido por diferentes autores para este tipo de eventos en otros volcanes (Chouet, 1985).

Notorio es el hecho de que en el Poás, las componentes horizontales y referentemente la componente E-W, orientada paralelamente al cráter, al interior de la cual está una fuente sísmica somera ($h < 500$ m), es la que registra las más bajas frecuencias según el análisis espectral (cuadro 1), por lo que la fase dispersiva de baja frecuencia característica de las señales del Poás es difícil explicar como una fase de ondas Rayleigh, la cual estaría polarizada en el

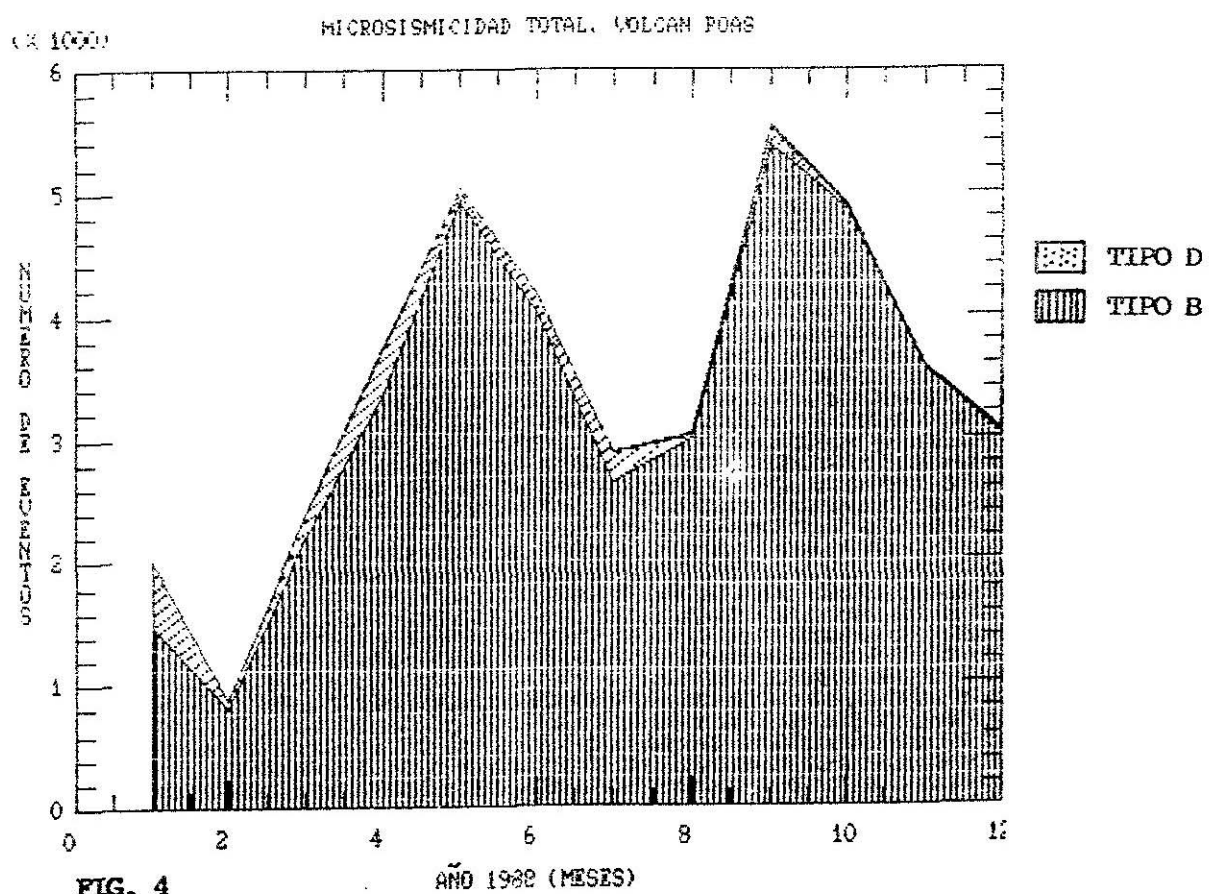
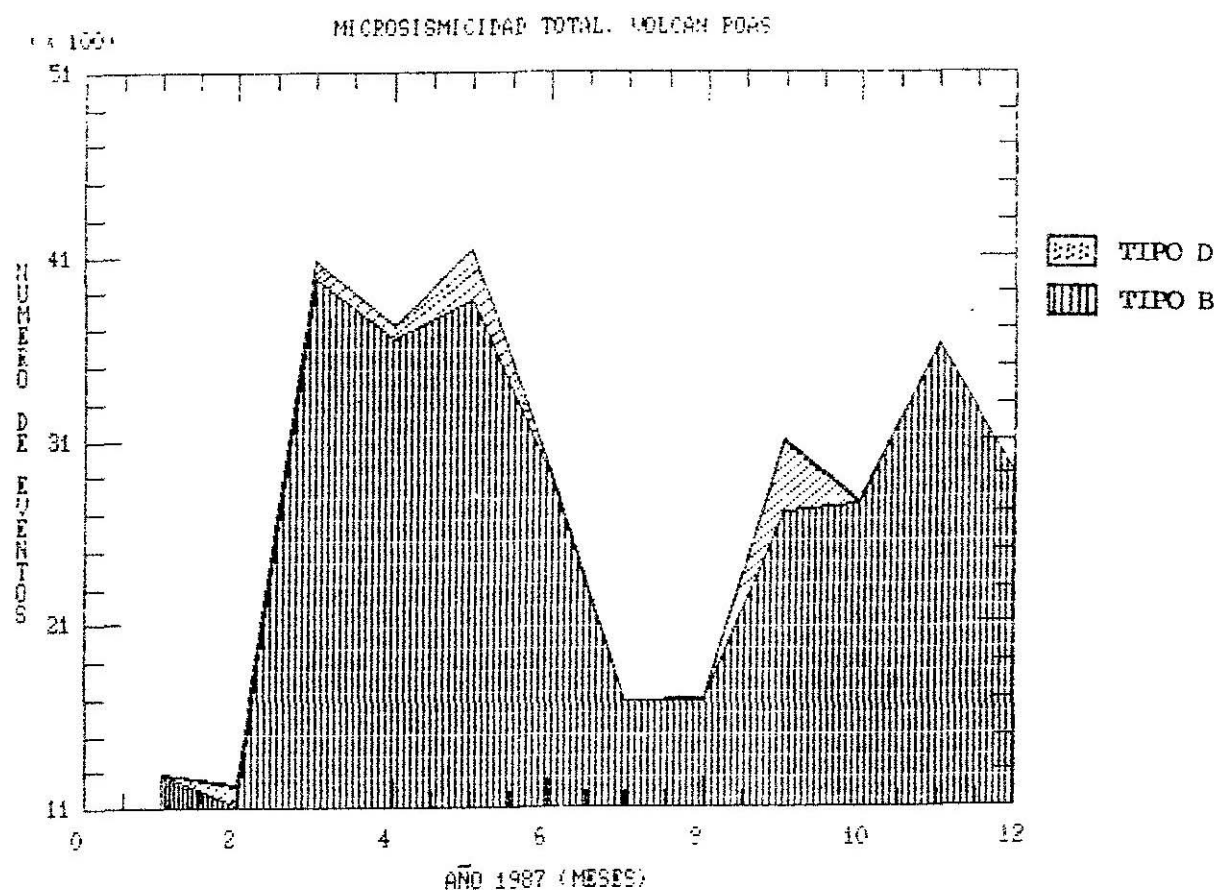


FIG. 4

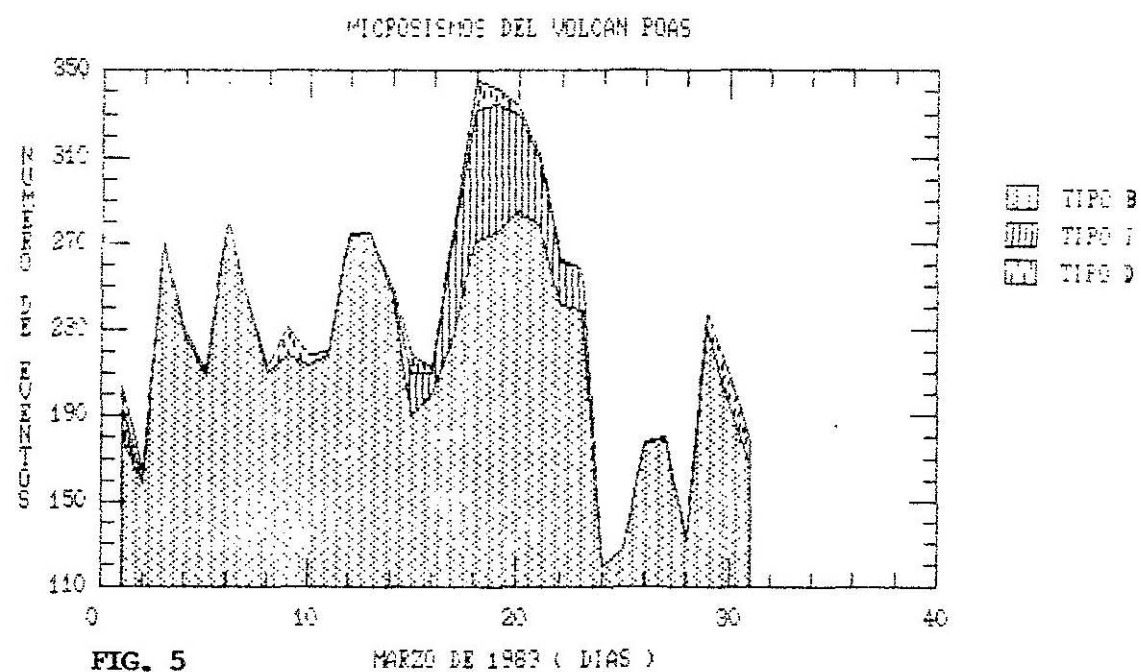
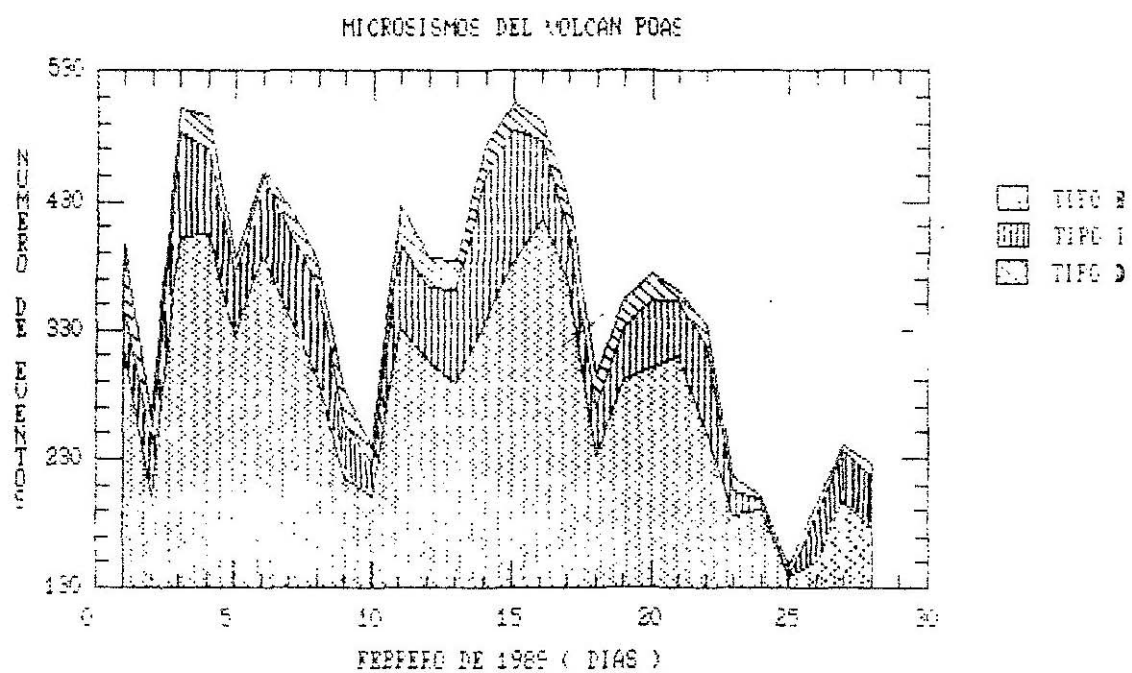


FIG. 5

ACTIVIDAD VOLCANICA O SEÑAL SISMICA	CUADRO 1	FRECUENCIAS CARACTERISTICAS ESPECTRO DE POTENCIA (Hz)	COMPONENTES DEL MOVIMIENTO
<u>A. VOLCAN ARENAL.</u>			
Erupción con explosión y caída de bloques			E-N-Z
Continuación señal anterior			E-N-Z
Erupción, fuerte explosión, caída de bloques			E-N-Z
Explosión con erupción muy pequeña			E-N-Z
Erupción sin explosión			E-Z-N
Erupción con explosión			N-E-Z
Desgasificación con explosión, origina señal pulsante			N-Z-E
Erupción, fuerte explosión, caída de bloques			E-Z-N
Erupción con pequeñas explosiones y derrumbes			N-E
Explosión y caída de bloques			E-N-Z
continuación señal anterior			N-E-Z
Ruido volcánico (trémor armónico) permanente			N-E-Z
Desgasificación - soplos como de fuelle (c)			N-E-Z
Desgasificación (sitio, inclinómetro J)			E-N
Erupción, fuerte explosión, caída de bloques			Z-N-E
Ruido sísmico (trémor)			E-Z-N
Ruido sísmico (trémor + derrumbes)			E-N-Z
Ruido sísmico (trémor + derrumbes)			N-Z-E
Trémor			E-N-Z
Trémor pulsante (no se ve ni escucha actividad)			N-E-Z
Trémor pulsante			N-E-Z
Erupción, explosión y caída de bloques			N-Z-E
Erupción con desgasificación fuerte y bloques			E-Z-N
Desgasificación débil, soplos - desfogue			E-N-Z
Desgasificación débil, soplos - desfogue			Z-E-N
Erupción con explosión, bloques, cenizas			Z-N-E
Derrumbes			N-E-Z
Erupción con pequeña explosión			N-E-Z
Explosión y trémor			Z-E-N
Explosión y trémor			N-E-Z
<u>B. VOLCAN POAS.</u>			
Evento de baja frecuencia y fase dispersiva			E Z N
Evento de baja frecuencia y fase dispersiva			E-N-Z
Trémor			E-N-Z
Evento de baja frecuencia, fase dispersiva			E-N-Z
Evento de baja frecuencia, fase dispersiva			E-N-Z
Evento de baja frecuencia			E-N-Z
Evento de baja frecuencia			E-Z-N
Evento de baja frecuencia y fase dispersiva			E-N
Evento de baja frecuencia y fase dispersiva			E-
Evento de baja frecuencia			E-N
Evento de baja frecuencia			N-E
Trémor armónico			-Z

plano vertical, por lo que sería más apropiado pensar en las fases dispersivas de ondas Love por estar polarizadas horizontalmente. Sin embargo, en los sismogramas de la componente vertical (2), es evidente la presencia de una fase dispersiva de baja frecuencia, por lo que la alternativa es pensar en la existencia de ambos tipos de onda como resultado de la energía atrapada de ondas cortantes que se convierten a fases dispersivas del tipo Rayleigh o Love muy cerca de la superficie, en un medio muy heterogéneo, anisotrópico y pseudo-estratificado, en un ambiente de topografía muy irregular. Lo anterior está entonces orientado a pensar que la fase dispersiva en las señales sísmicas del Poás, está más en relación con los efectos de la trayectoria y el sitio de registro, que con la fuente sísmica. Pero aún así, queda la posibilidad de que la complejidad del proceso en la fuente, la cual incluye la parte dinámica del gas y el fluido magma, genere una señal sísmica que favorece la forma de la onda observada en el sismograma. Como lo propone Aki (1988), debemos diseñar y ajustar un experimento único para cada área volcánica, para descifrar las señales sísmicas, que en nuestro caso particular, son las del Poás.

CONCLUSIONES

Las frecuencias dominantes de los espectros de las señales analizadas para el Arenal, se encuentran en una banda angosta entre los 1 y 4 Hz con la moda cercana a los 2 Hz. Frecuencias secundarias en el espectro entre los 5 y 15 Hz se presentan con los derrumbes o desprendimientos de rocas, en coincidencia a veces con la explosión de una erupción. En el caso del Poás, la banda espectral también es angosta, pero corrida hacia las bajas frecuencias, con una moda próxima a 1,7 Hz; y con una frecuencia mínima de 0,35 Hz y máxima de 2,25 Hz. Para un tremor armónico del Poás, (McNutt, comun. escrita), obtuvo un espectro en donde la frecuencia característica es de 3 Hz. (Dicho valor aparece al final del cuadro 1).

La cercana coincidencia de la moda de las frecuencias fundamentales para las señales de ambos volcanes sugiere en parte un proceso físico similar, como lo es la "desgasificación" superficial ($h \leq 500$ m), la cual es en la actualidad muy intensa en el Arenal, comparada con el Poás, comportándose el Arenal como un sistema eruptivo de conducto relativamente abierto en donde el movimiento u oscilación del magma dentro del conducto volcánico, o bien la explosión o desgasificación generada por el exceso de la presión del gas en el magma

vesiculado, causan vibraciones o fenómenos de resonancia en el conducto, que dan por resultado las señales analizadas.

En el caso del Poás, éste es un sistema activo pero con manifestaciones eruptivas muy débiles y superficiales, con un conducto cerrado pero posiblemente fisurado, donde la interacción de una intrusión magmática con el agua subterránea, genera un pulso o golpe como resultado de la expansión súbita del vapor de agua, que a su vez podría producir o excitar fracturas preexistentes, originándose una señal de baja frecuencia, característica de la actividad del Poás.

La presencia de eventos volcánicos de baja frecuencia (explosiones y eventos tipo B) en número de miles por mes a finales del año 1988, con un incremento del orden de varios miles en enero y febrero de 1989, de darse la aparición futura de trémores en las señales sísmicas del Poás, podría indicar la inminencia de una fuerte erupción, por lo cual es necesario ahora correlacionar los datos sísmicos con medidas geodésicas y gravimétricas para su prevención o vigilancia en relación a la evolución del proceso volcánico interno.

AGRADECIMIENTOS

A los funcionarios de la "Red Sismológica Nacional" ICE-UCR, por su permanente colaboración. En particular a los técnicos electrónicos, Luis Aguilar y Luis F. Brenes; y a los geólogos Wilfredo Rojas y Mario Fernández. Al gobierno japonés, JICA, por su valiosa donación, y al Dr. William Melson por su interés en nuestros estudios y gentil invitación al taller sobre los volcanes de Costa Rica en noviembre de 1988 (Washington D.C.). Este trabajo es parte del proyecto No. 805-85-073 financiado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

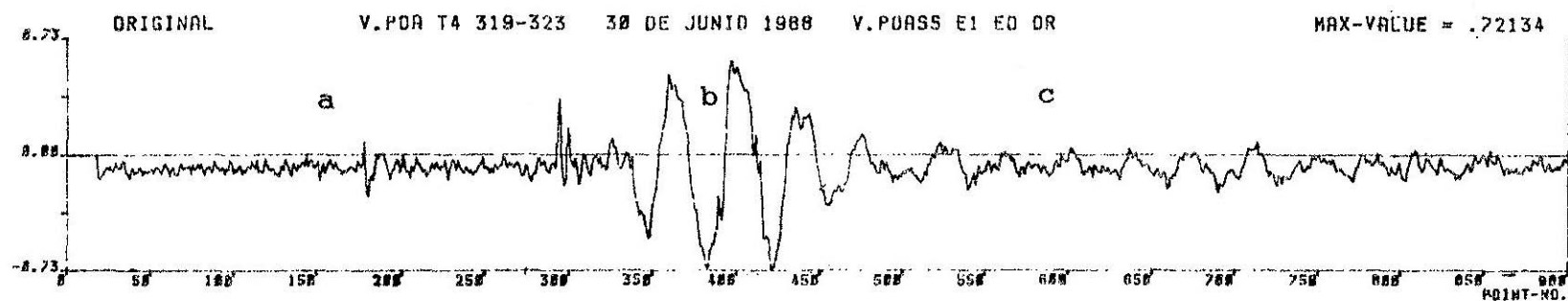
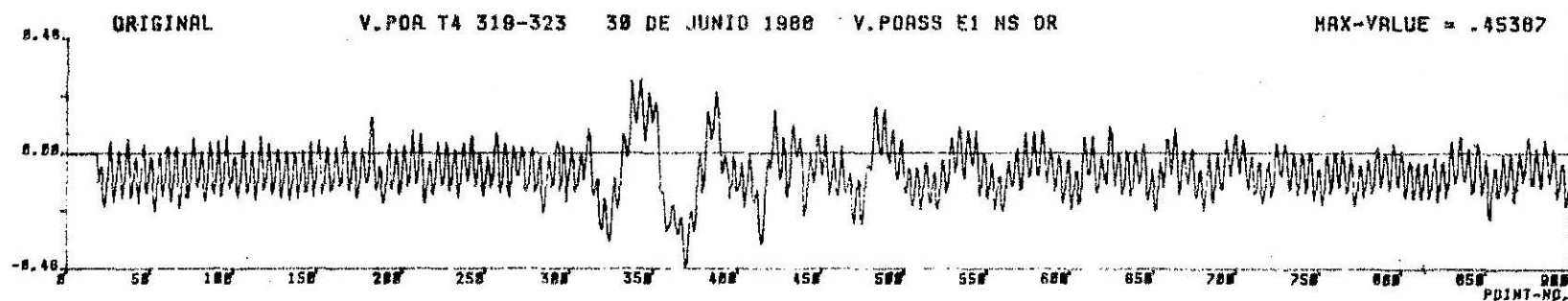
REFERENCIAS

- Aki, K., 1988: State of the art in Volcanic Seismology. Submitted to the Proceeding of International Workshop on Volcanic Seismology, at Capri, Italy in october 1988, 16 pags.
- Aki, K., 1984: Evidence for magma intrusion during the Mammoth Lakes earth quakes of May 1980 and implications of the absence of volcanic (harmonic) tremor, J. Geophys. Res. 89, 7689-7696.
- Aki, K., M. Fehler and S.Das, 1977: Source mechanism of volcanic tremor: fluid-driven crack models and their application to the 1963 Kilauea eruption, J. Volcanol. Geotherm. Res. 2, 259-287.
- Alvarado, G., Barquero, R., 1987: Las Señales Sísmicas del Volcán Arenal (Costa Rica) y su relación con las Fases Eruptivas (1968-1986). Ciencia y Tecnología. 11(1): 15-35.
- Alvarado, G., Matumoto, T., Borgia, A., y Barquero, R., 1988: Síntesis Geovulcanológica del Arenal (Costa Rica): 20 años de continua actividad eruptiva (1968-1988). Bol. Obs. Vulc. Arenal, Instituto Costarricense de Electricidad, 1 (1):1-55 págs.
- Araña, V. y Ortiz, R., 1984: Vulcanología. xv + 150 pags.; Consejo Superior Investigaciones Cient., Edit. Rueda; Madrid.
- Casertano, L., A. Borgia, C. Cigolini, L.D. Morales, W. Montero, M. Gómez and J.F. Fernández, 1987: An integrated dynamic model for the volcanic activity at Poas Volcano, Costa Rica. Bull. Volcanol. 49: 588-598.
- Casertano, L., A. Borgia, C. Cigolini, L.D. Morales, W. Montero, M. Gómez, J.F. Fernández, 1985: Investigaciones Geofísicas y Características Geoquímicas de las aguas hidrotermales: Volcán Poás, Costa Rica. Geof.Int. 44-2: 315-352.
- Casertano, L., A. Borgia, C. Cigolini, 1983: El Volcán Poás, Costa Rica: Cronología y Características de la Actividad. Geof. Int., 22-3: 215-236.
- Chouet, B., 1981: Ground motion in the near field of a fluid-driven crack and its interpretation in the study of shallow volcanic tremor, J. Geophys. Res. 86: 5985-6016.
- Chouet, B., 1985: Excitation of a buried magmatic pipe: A seismic source model for volcanic tremor. J. Geophys. Res. 90: 1881-1893.
- Matumoto, T., 1976: Prediction of a volcanic eruption implied from seismic data. Rev. Geogr. Inst. Panamericano de Geografía e Historia, 5: 285-293.
- Minakami, T., Utibori e Hiraga, S., 1969: The 1968 Eruption of the Arenal Volcano, Costa Rica. Bull. of the Earth Res. Inst., 47: 783-802.
- Minakami, T., 1969: Earthquakes originating from Volcanoes. Atti XVIII. Conv. Ass. Geof. Ital, 1-4: 1-38: Napoli.

- McNutt, S., 1986: Observations and analysis of B-type earthquakes, explosions, and volcanic tremor at Pavlof Volcano, Alaska. Bull. of the Seism. Soc. America, 76 (1): 153-175.
- Montero, W., 1984: Informe sismológico del Volcán Arenal, período de junio a agosto de 1984. 22 págs + figs., Instituto Costarricense de Electricidad, Dept. Geología (Informe Interno); San José.
- Rymer, H., and Brown, G.C., 1987: Causes of Microgravity change at Poas Volcano, Costa Rica: An active but non-erupting system. Bul. Volcanol. 49: 389-398.
- Riuscetti, M., Schick, R., and Seidl, D., 1977: Spectral parameters of volcanic tremors at Etna. J. of Volcanol. and Geother. Res., 2: 289-298.
- Schick, R., 1981: Source Mechanism of Volcanic Earthquakes. Bull Volcano., 44-3: 491-497.
- Schick, R., and Riuscetti, M., 1973: An Analysis of Volcanic tremors at South Italian Volcanoes. Zeitschrift für Geophysik. Band 39, Seite 247-262, Würzburg.
- Seidl, D., Schick, R., Riuscetti, M., 1981: Volcanic Tremors at Etna: A model for Hidraulic Origin. Bull. Volcanol., 44:(1), 43-56.

APENDICE

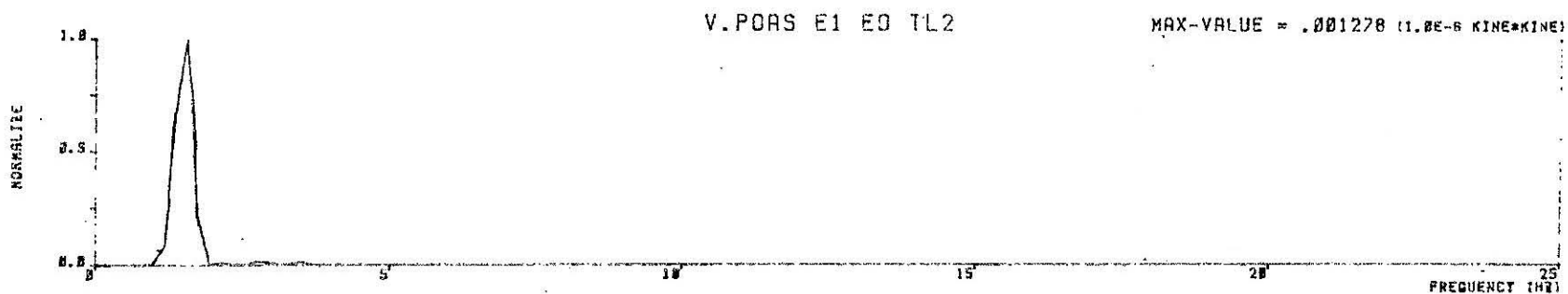
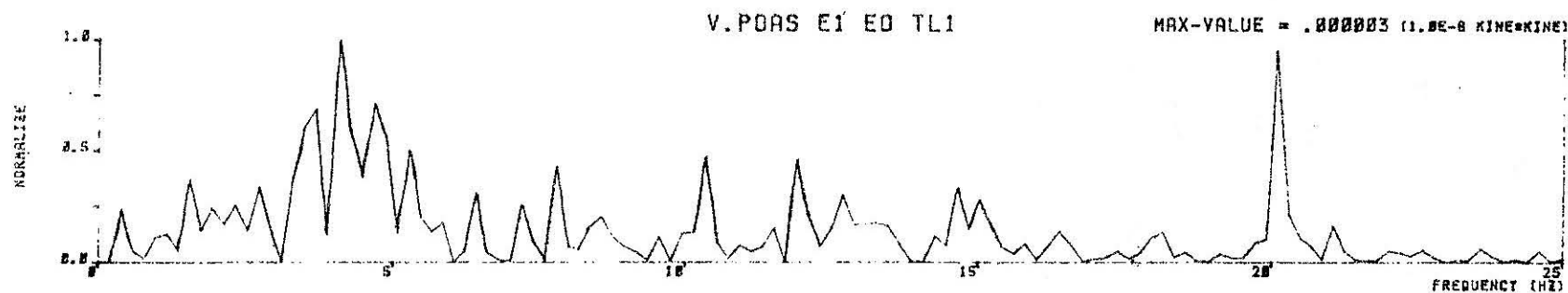
- 1.- Señal de baja frecuencia, Volcán Poás.
 - 1.1.- Componentes horizontales de la señal sísmica.
 - 1.2.- Espectros de potencia correspondientes, componente E-O, para los tres diferentes segmentos, a,b,c; en que se divide la señal original.
- 2.- Señal de una "erupción" con explosión y caída de bloques, Volcán Arenal.
 - 2.1. La señal sísmica en sus tres componentes, N-S, E-O, Z-Z..
 - 2.2.- Espectro de Potencia para cada uno de las tres componentes, N-S, E-O y Z-Z.
- 3.- Tremor (pulsación), Volcán Arenal.
 - 3.1.- La señal sísmica en sus tres componentes, N-S, E-O, Z-Z.
 - 3.2.- Espectro de Potencia, para cada una de las tres componentes.
- 4.- Desgasificación fuerte, Volcán Arenal.
 - 4.1.- Componente vertical de la señal sísmica, dividida en tres segmentos.
 - 4.2.- Espectro de potencia, componente Z, para los tres segmentos.

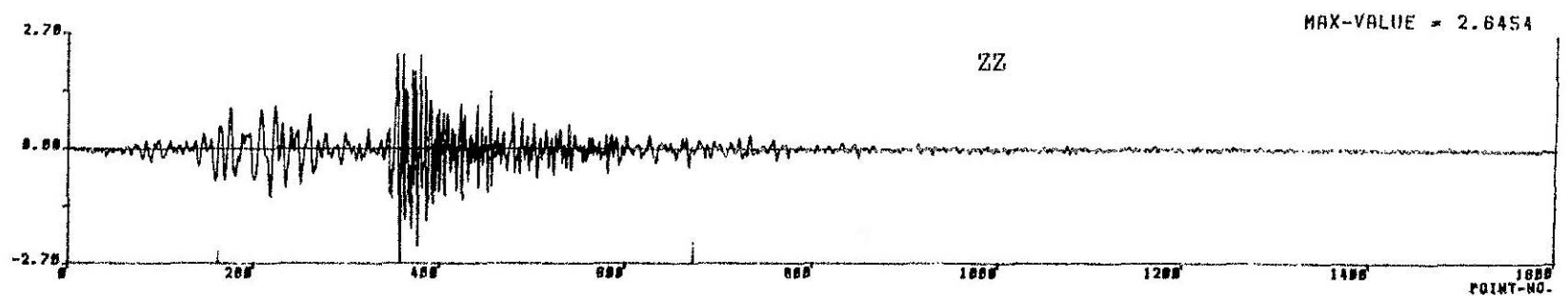
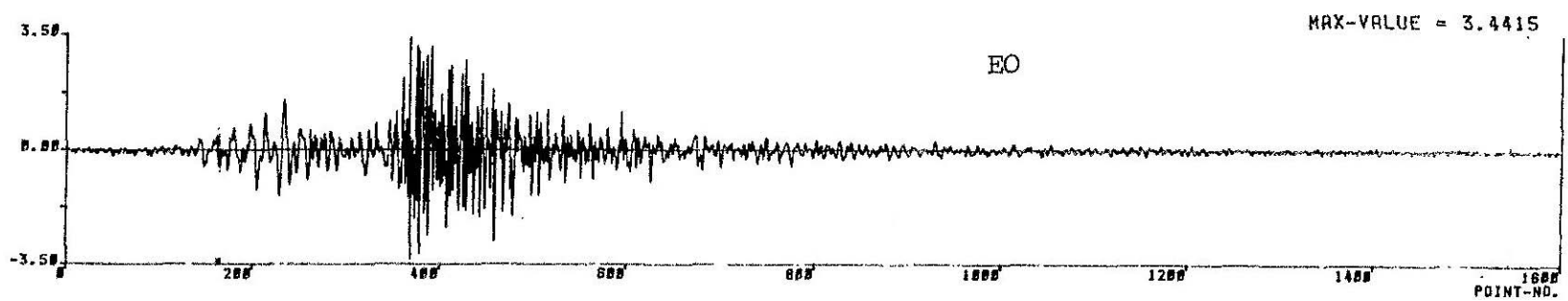
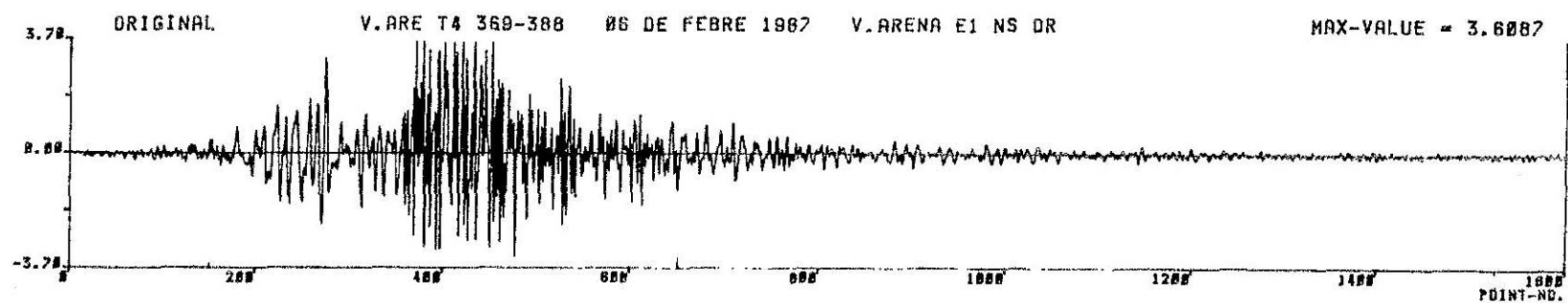


----- POWER SPECTRUM -----

PAGE: 1

PLCE DATE FREQUENCY-WINDOW FREQUENCY-INTERVAL
V.POR T4 319-323 30 DE JUNIO 1988 0.0 TO 25.000 (HZ) 0.195 (HZ)

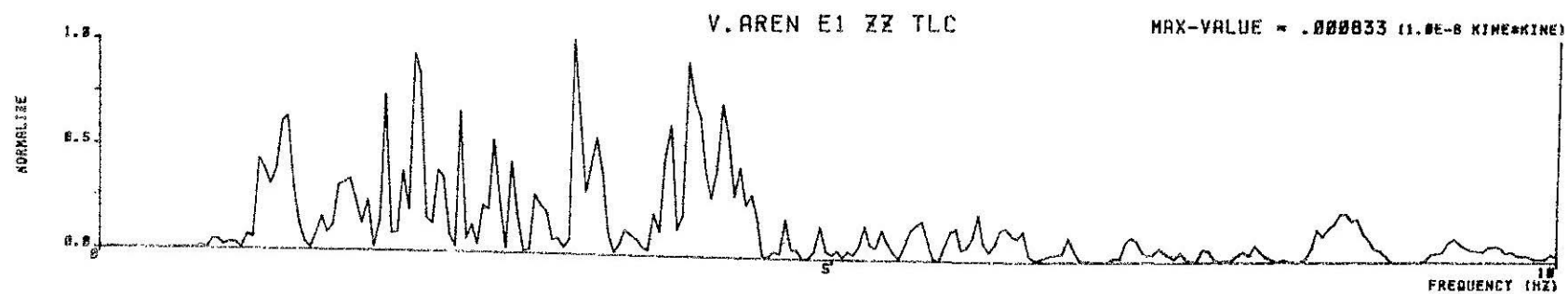
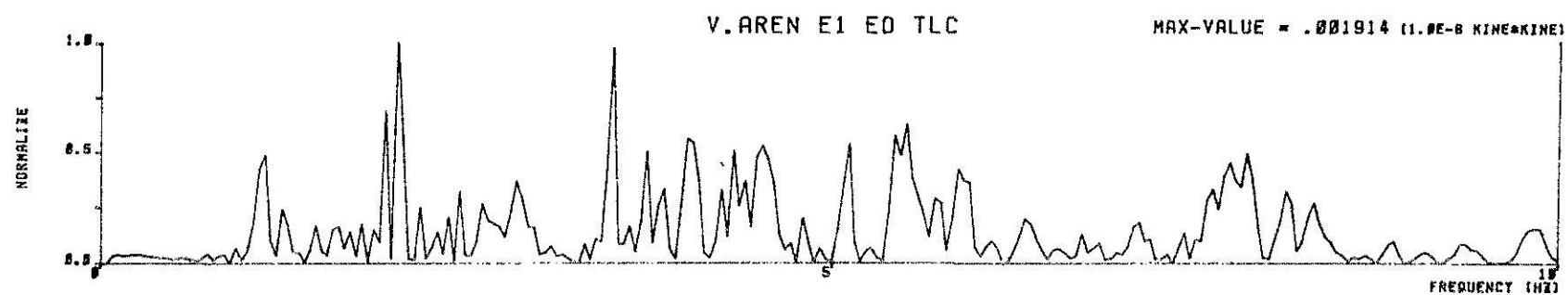
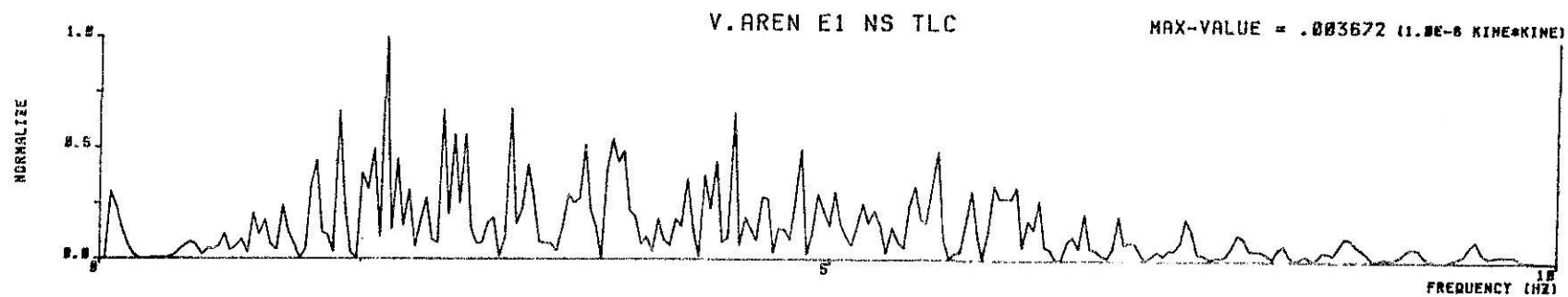


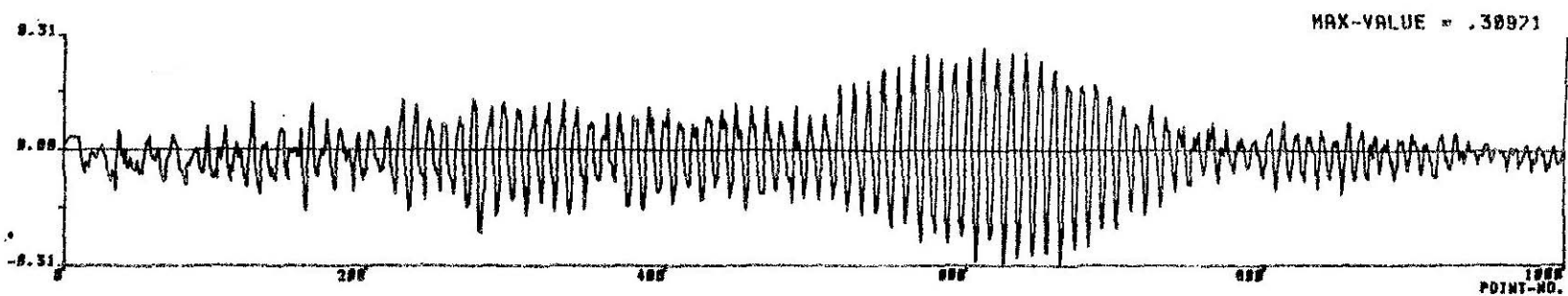
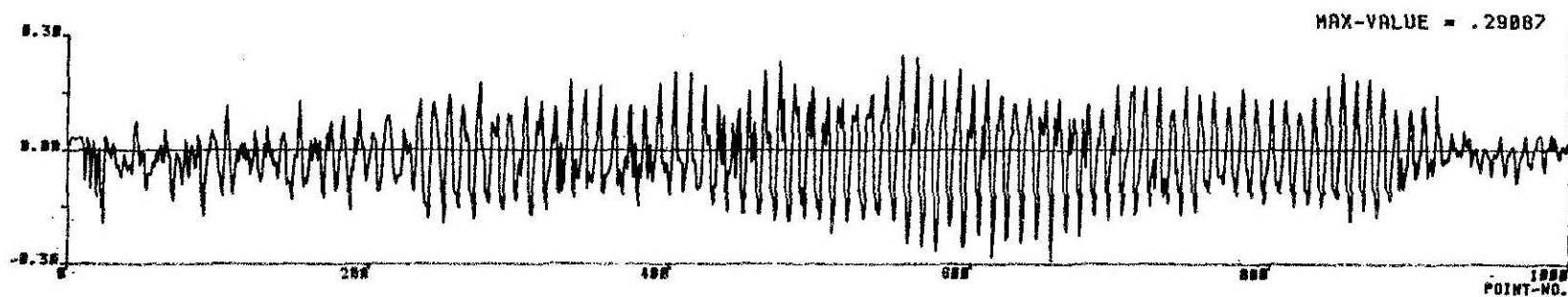
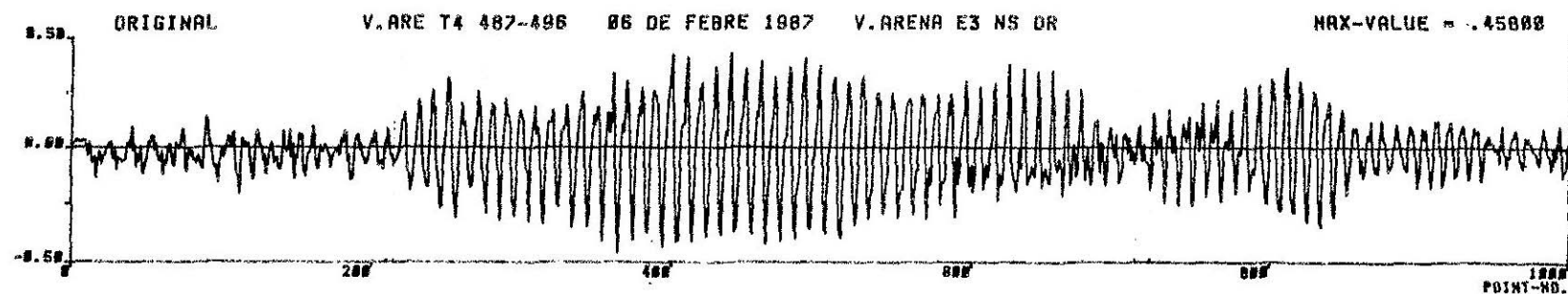


----- POWER SPECTRUM -----

PLACE	DATE	FREQUENCY-WINDOW	FREQUENCY-INTERVAL
V.ARE T4 389-388	06 DE FEBRE 1987	0.0 TO 10.000 (HZ)	0.039 (HZ)

PAGE: 1

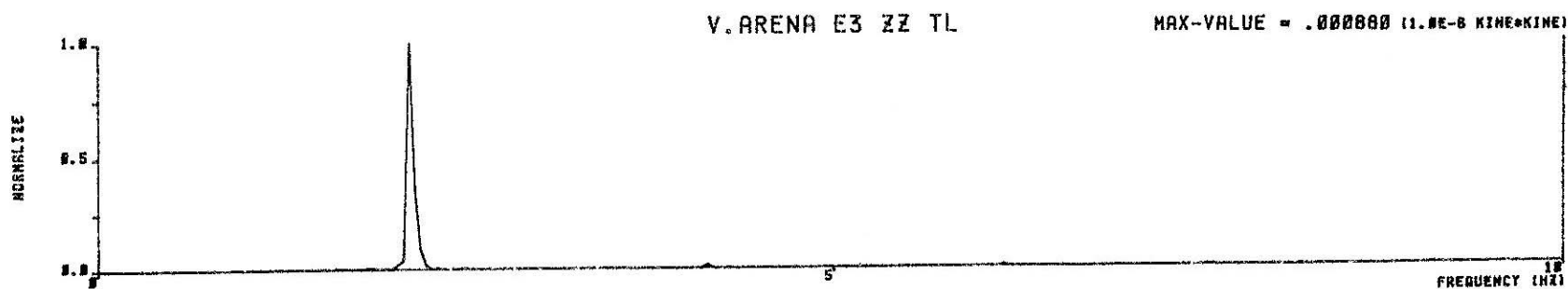
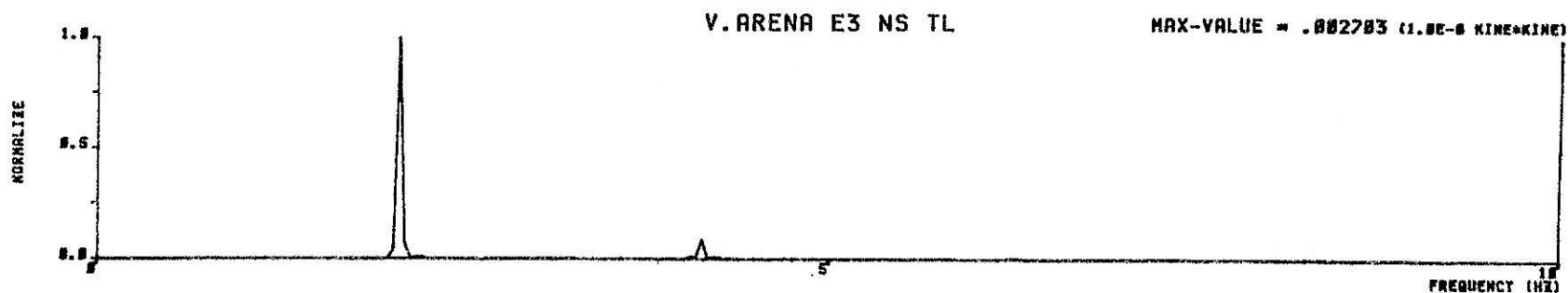


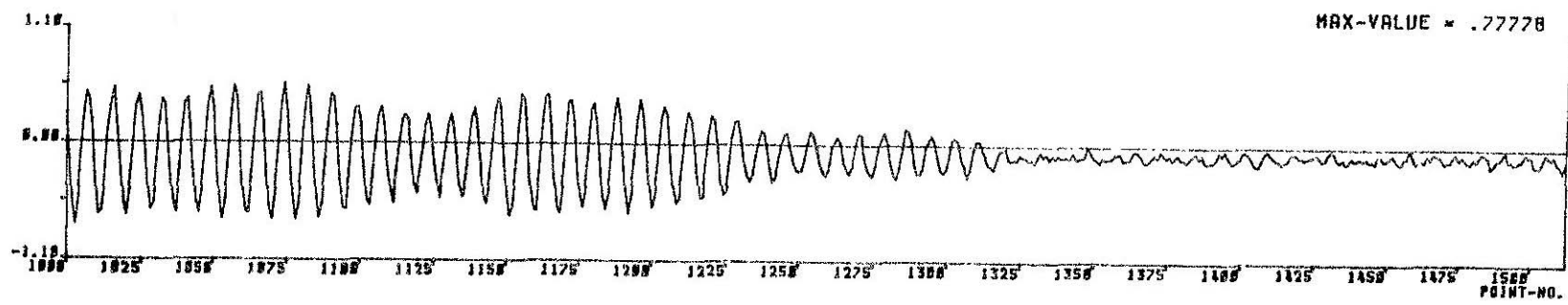
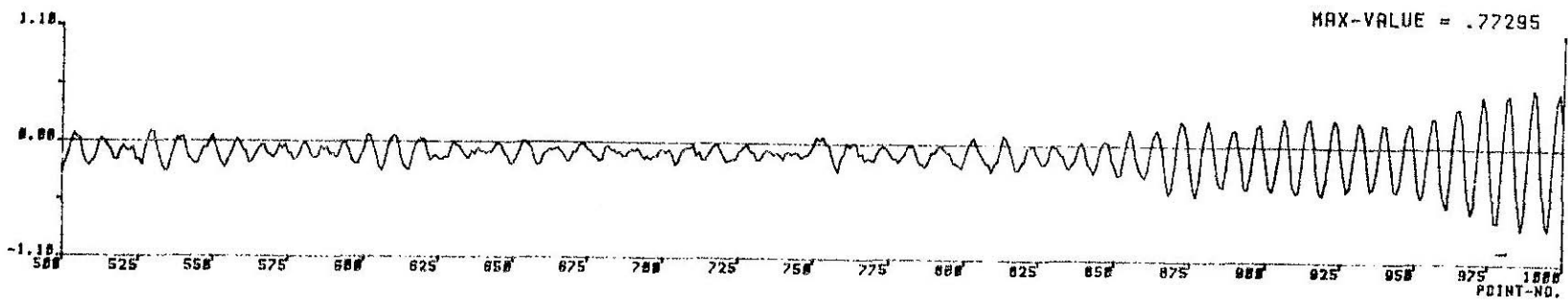
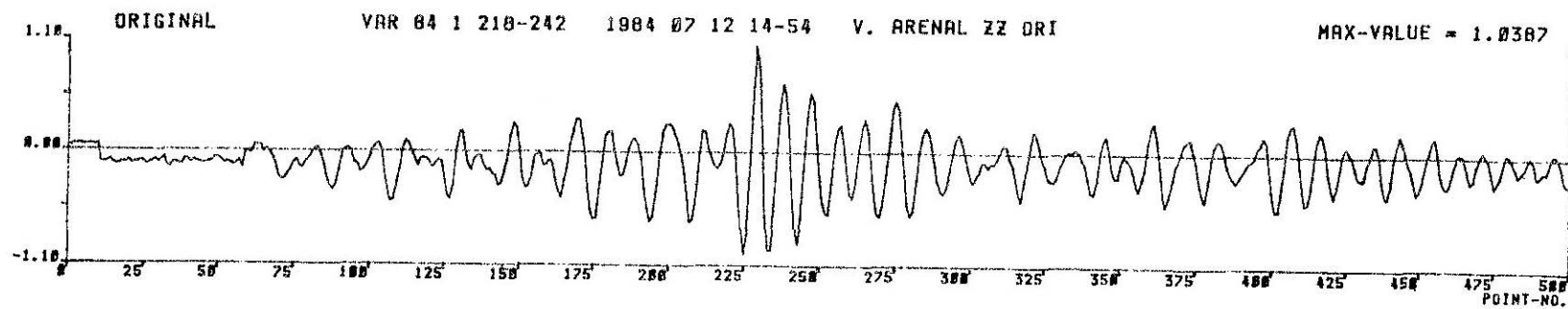


POWER SPECTRUM

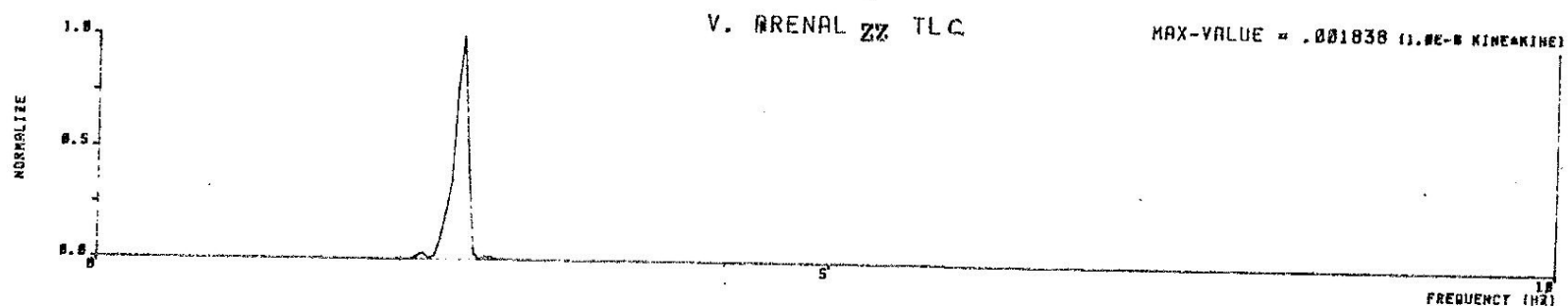
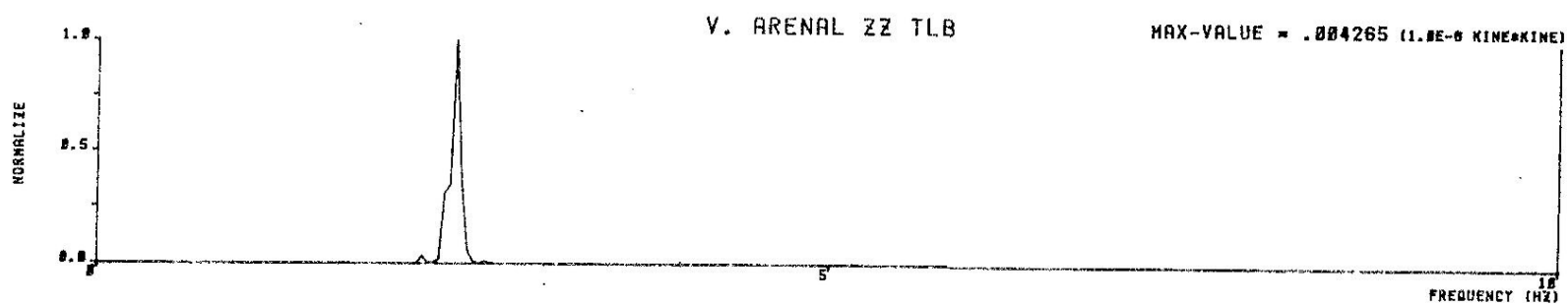
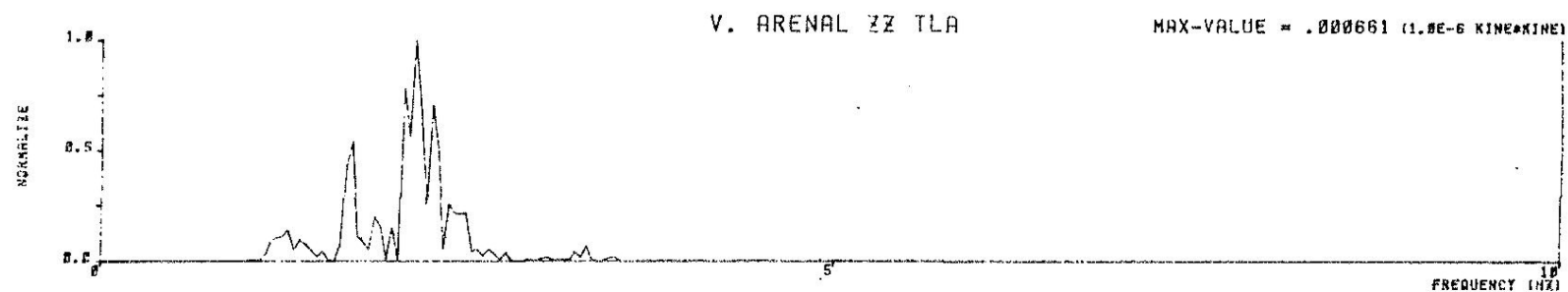
PAGE: 1

PLACE V.ARE T4 487-496 DATE 06 DE FEBRE 1987 FREQUENCY-WINDOW 0.0 TO 10.000 (HZ) FREQUENCY-INTERVAL 0.039 (HZ)





... 12 14-54 0.0 TO 10.000 (HZ) 0.039 (HZ)



INTERPRETACION PRELIMINAR DE LAS DEFORMACIONES ASOCIADAS AL VOLCAN ARENAL (COSTA RICA)

Guillermo E. Alvarado ¹
Samuel Argueta Domínguez ²
Carlos Cordero Calderón ³

Resumen

Los estudios de las deformaciones asociadas al volcán Arenal han sido realizadas por diferentes grupos en 1969, en 1974-1978 y a partir de 1982 hasta el presente. Todos los datos congruentemente muestran una continua deflación del aparato volcánico, con pequeños pulsos de inflación del orden de 10 micro-radianes. La deflación parece estar fundamentalmente vinculada al peso de las coladas de lava eruptadas desde 1968 hasta el presente (0.5 Km³), mientras que los pequeños pulsos de inflación pueden ser un efecto de ruido natural (precipitación-infiltración pluvial, condiciones del sub-suelo, errores en las medidas) o a un efecto hidromagmático del conducto eruptivo, o una combinación de ambos. En la actualidad el C.V.A.-ICE posee una red de 9 inclinómetros secos radiales y 2 líneas para medidas con distanciómetro electrónico.

Abstract.

The studies of deformations associated to Arenal volcano were carried out by different groups in 1969, 1974-1978 and 1982 to present. In the same way, all data shows a continuous subsidence at the volcano, with small episodes of uplifting in the order of 10 microradians. The subsidence seems to be related to the ground loading due to the lava flows erupted since 1968 up to present (0.5 Km³), while the small inflation episodes could be an effect of natural noise (pluvial precipitation-infiltration, sub-soil conditions, errors in measurements) and/or an hydromagmatic effect of the eruptive conduit. At the present time the C.V.A.-ICE has a 9 radial dry-tilt network and 2 E.D.M. lines.

-
1. Sección de Sismología e Ing. Sísmica, ICE, Apdo. 10032 San José, Costa Rica.
 2. Sección de Topografía, ICE, Apdo. 10032, San José, Costa Rica
 3. Auscultación de Obras, ICE, Apdo. 10032, San José, Costa Rica

INTRODUCCION.

Es bien conocido que durante la actividad eruptiva de un volcán o como una manifestación premonitora, suelen registrarse deformaciones substanciales en la superficie terrestre, en las vecindades del complejo volcánico, siendo por ello, los estudios de deformación uno de los sistemas de auscultación volcánica frecuentemente utilizados a nivel mundial. Sin embargo, para que este sistema tenga utilidad real en la vigilancia del volcán, los datos deberán obtenerse con relativa frecuencia y en el menor tiempo posible.

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) a través del Departamento de Geología y la Sección de Sismología e Ing. Sismica, se ha preocupado por llevar a cabo en forma más o menos continua, estudios vulcanológicos en el Arenal por espacio de 15 años, dada la cercanía de la presa de Sangregado (6.5 Km), obra vital para el Complejo Hidroeléctrico Arenal-Corobici. El presente trabajo resume las campañas realizadas con inclinómetros en años anteriores por diferentes científicos y los recientes resultados obtenidos en forma preliminar por el D.V.A. durante los últimos tres años. Además, se incluyen los primeros datos obtenidos con distanciómetro electrónico en el ICE.

TRABAJOS ANTERIORES EN EL ARENAL

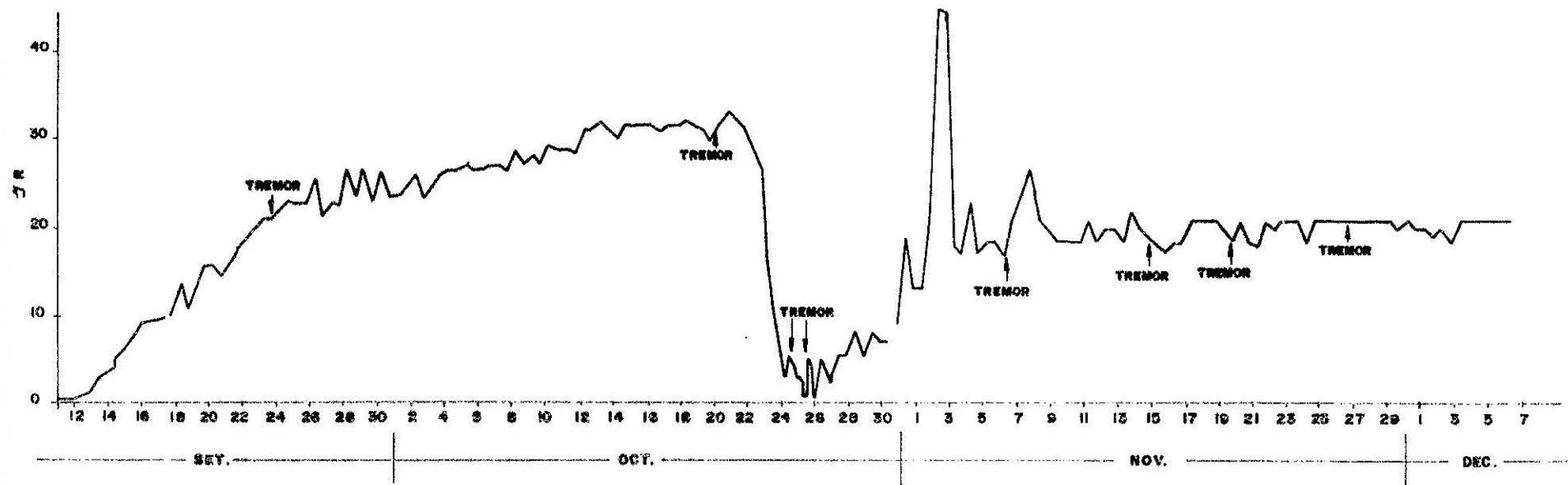
Sawdo & Simon (1969) y Simon et al. (1970), instalaron a principios de 1969, un inclinómetro diamagnético, aproximadamente a 1.2 Km al sur del cráter inferior o A, el cual operó hasta el 30 de abril de 1969, cuando se reubicó por considerarse el sitio inadecuado. A principios de setiembre de ese mismo año se reubicó a una distancia de 3.5 Km al N22°W del cráter A, iniciándose los registros a partir del día 11 del mismo mes; manteniéndose en operación por lo menos hasta el 14 de diciembre de 1969 (Fig. 1).

Los registros obtenidos para este corto período indican varios episodios de subsidencia e inflación del orden de 10 micro-radianes. Estos datos indicaban preliminarmente que el fenómeno de inflación se debía a la cámara magmática ubicada a unos 4 Km de profundidad (aproximadamente bajo el cráter B, hoy día cubierto por coladas), mientras que la deflación a la acción de ésta y al peso de las coladas de lavas activas (Simon et al., 1970) Fig. 2.

El ICE, en octubre de 1974, instaló cuatro inclinómetros ecos a lo largo de una línea radial al Arenal en el flanco este, los cuales operaron por espacio de más de dos años, siendo efectuadas las mediciones con un nivel Wild N3 y una estadía de recisión. Entre el 19 de octubre de 1976 y el 18 de enero de

FIG. N° 2

REGISTRO INCLINOMETRICO CONTINUO DEL VOLCAN ARENAL (SET-OCT, 1969) TOMADO DE SIMON et al. (1970).



1978 (452 días) ocurrió una deflación de 60 microradianes a lo largo de la radial (C_1-C_2) de la estación C. Los periodos de leve inflación fueron seguidos por largos periodos de fuertes deflaciones que se correlacionan bien con fases de alta tasa de emisión de coladas (Melson, 1978). Fig. 3.

En general, Melson et al. (1979) interpretan estos resultados como coherentes con la existencia de una cámara magmática somera (2 Km bajo la superficie), acorde con el modelo de Mogi (1958) Fig.4.

Wadge (1983) usando un modelo de deformación con elementos finitos del volcán, concluye que la deflación durante los dos años de registros (Melson et al., 1979) es debida al peso de las coladas de lava y no a una cámara magmática. La discrepancia entre el volumen de lava predicho por el segundo modelo (sensu Melson, op. cit.) con respecto al volumen erupcionado durante 1976-1978, va acorde con el sobrecargo de las lavas. Sugiere además, que el magma suplido por el Arenal es continuo desde una fuente en la corteza inferior o el manto superior.

Van der Laat (1986, 1988) comenta que a partir de setiembre de 1983 y especialmente a partir de febrero de 1984, la red de inclinómetros del DVSICORI-UNA, ubicados en las partes bajas (550 m.s.n.m.) del volcán, empezaron a detectar una inflación (10-20 micro-rad/mes) y que a partir de marzo, otras estaciones, las mas elevadas (800 m.s.n.m.) en el flanco oeste, mostraron inflaciones de 30 micro-rad/mes, lo cual posteriormente fue relacionado con el ascenso de magma, responsable de las explosiones de los meses de mayo-junio de ese año y que se mantienen hasta hoy día. Luego, la red de inclinómetros continuó registrando una deflación semejante a la obtenida previamente (10 micro-rad./mes).

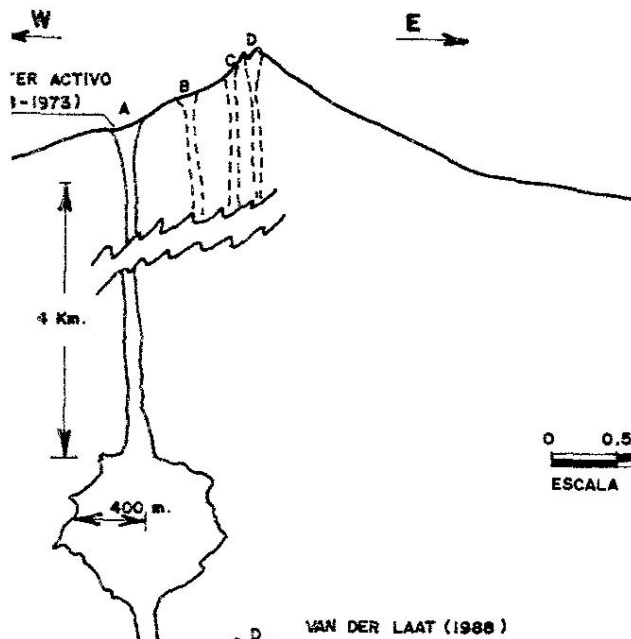
Según Van der Laat (1988) la mayor deformación registrada en el Arenal durante los últimos seis años es de 55 microradianes anuales, en forma de deflación, lo cual es coherente con la continua emisión de lava. Agrega que es clara una tendencia general de deflación con algunas sobreimposiciones en forma de pulsos, de inflación, proponiendo una cámara magmática a una profundidad de 1500-800 m, para un volumen equivalente de $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ (un kilómetro de radio); y un punto de máxima deformación situado a 600 m al oeste del crater activo o C (Fig. 4).

Matumoto (en Alvarado et al., 1988) con base en un tremor de muy baja frecuencia, registrado en 1975, estima la existencia de una cámara magmática de 3.3 Km de radio (Fig. 4).

FIG. N° 4

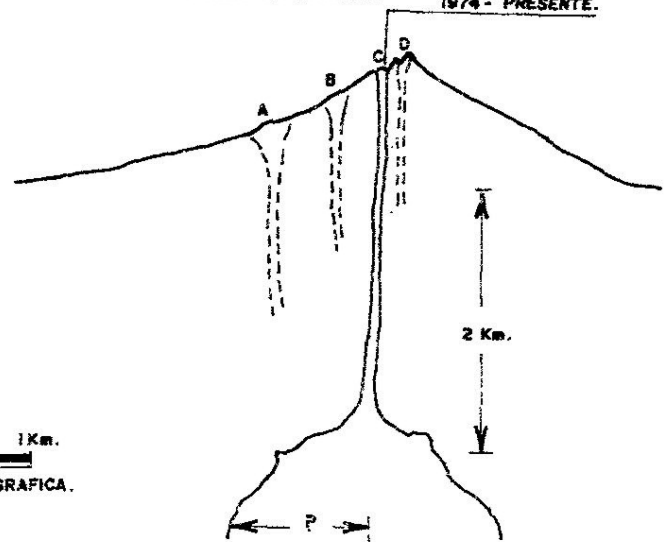
DIFERENTES MODELOS SOBRE LA ALIMENTACION DEL ARENAL Y SU INFLUENCIA EXTERNA.

ION et al. (1969)



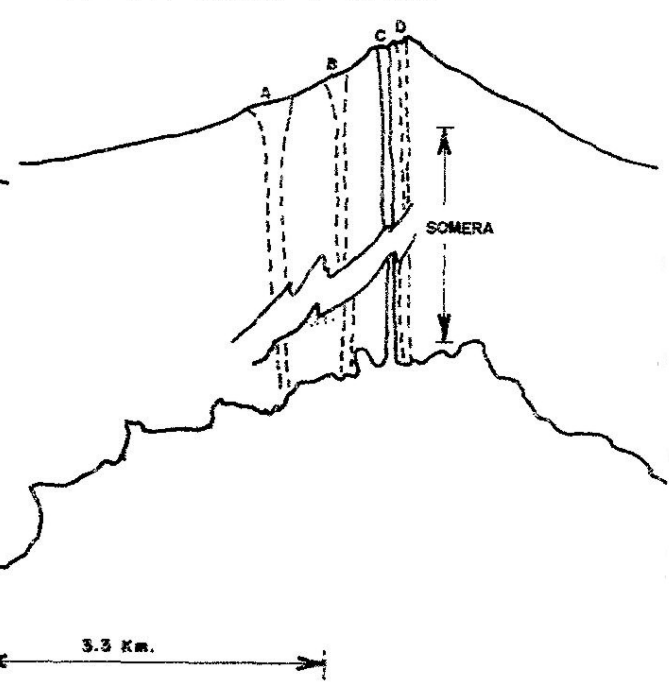
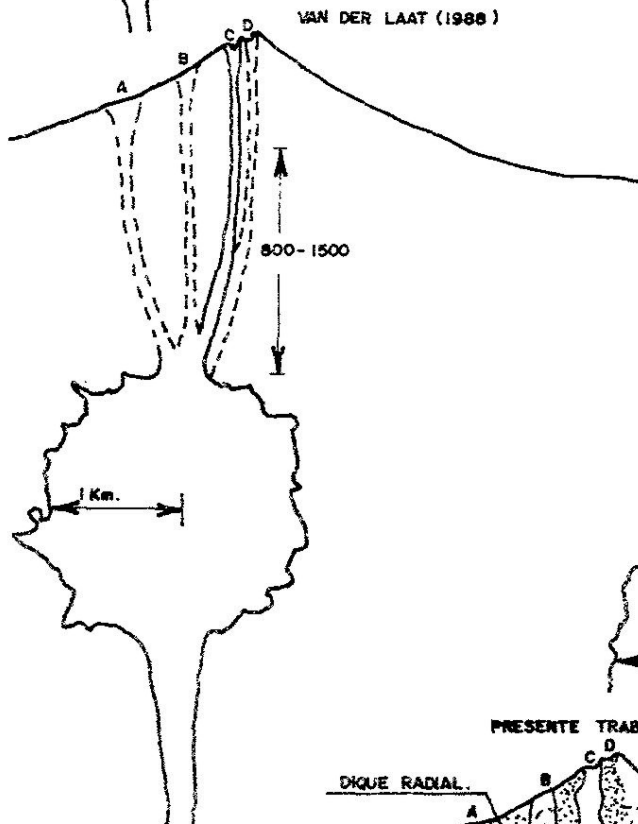
MELSON et al. (1979)

CRATER ACTIVO.
1974 - PRESENTE.

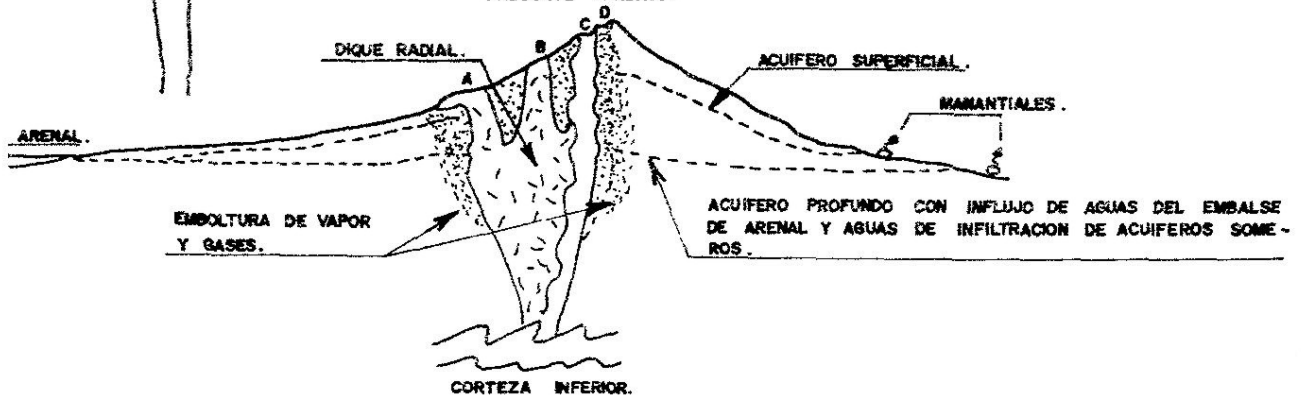


0 0.5 1 Km.
ESCALA GRAFICA.

MATUMOTO (EN ALVARADO et al. 1989)



PRESENTE TRABAJO.



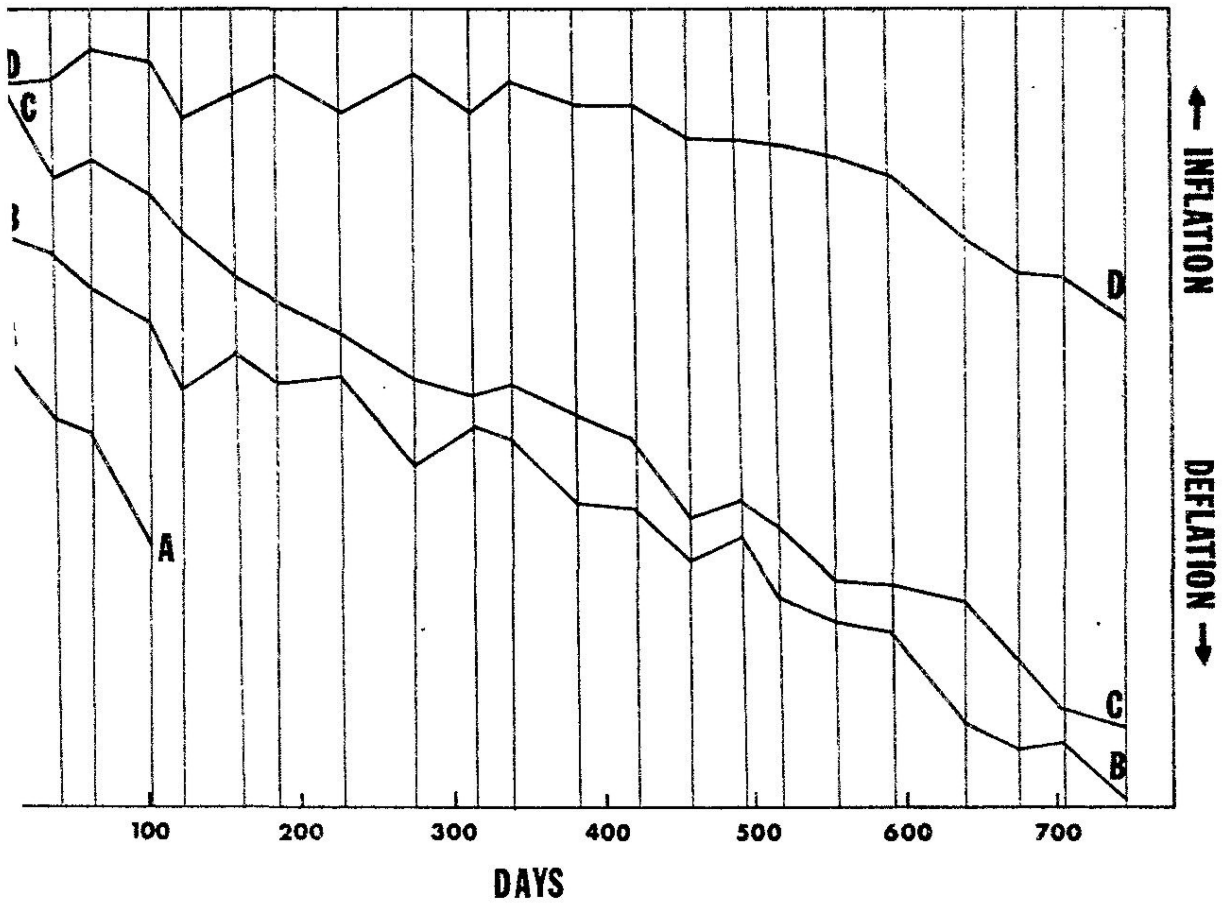


FIGURA No.3

Inflación/deflacion radial al cráter del Arenal, en mm/km (micro-radianes); en los inclinómetros secos A, B, C, D, del 19 de octubre de 1976 al 3 de noviembre de 1978 (Melson et al, 1979).

METODOLOGIAS E INSTRUMENTACION:

El equipo utilizado por el ICE para efectuar las mediciones a la red de inclinómetros secos es un nivel de alta precisión (N3) y miras de invar. El dato puede leerse a la décima de milímetro y se puede aún estimar la centésima, conociéndose en este orden de exactitud las diferencias de elevación entre los vértices de la figura geométrica a medir, que conforma el inclinómetro. Es con base en estos datos de campo y al modelo matemático aplicado que, en el caso de existir movimientos, se detectará un vector de inclinación en el plano de la figura geométrica, inclinación dada en microradianes (1 micro-radián = $1'' = 1\text{cm/Km}$).

También se realizan medidas con distancias radiales inclinadas al centro de actividad o de posible deformación. El equipo utilizado por el ICE es un distanciómetro con un error medio cuadrático de $\pm 5\text{mm} + 5 \times D$ (donde D es en Km), y en donde las distancias se dan ya corregidas por factores atmosféricos de presión y temperatura.

INTERPRETACION DE LA SERIE DE DATOS (1986-1988):

Los datos de los nueve inclinómetros secos del ICE, ubicados en forma radial en el volcán Arenal (B,C,D,E,F,G,I,J y K) se pueden resumir de la siguiente manera (Fig. 1 y 5).

a) Los inclinómetros B y C muestran una continua deflación hacia el NE y ENE, respectivamente más o menos paralela; sin embargo, al estar ubicados muy cerca uno del otro (370 m), muestran poca diferencia de magnitud total (diferencia entre la primera y la última medida) de 115 microradianes.

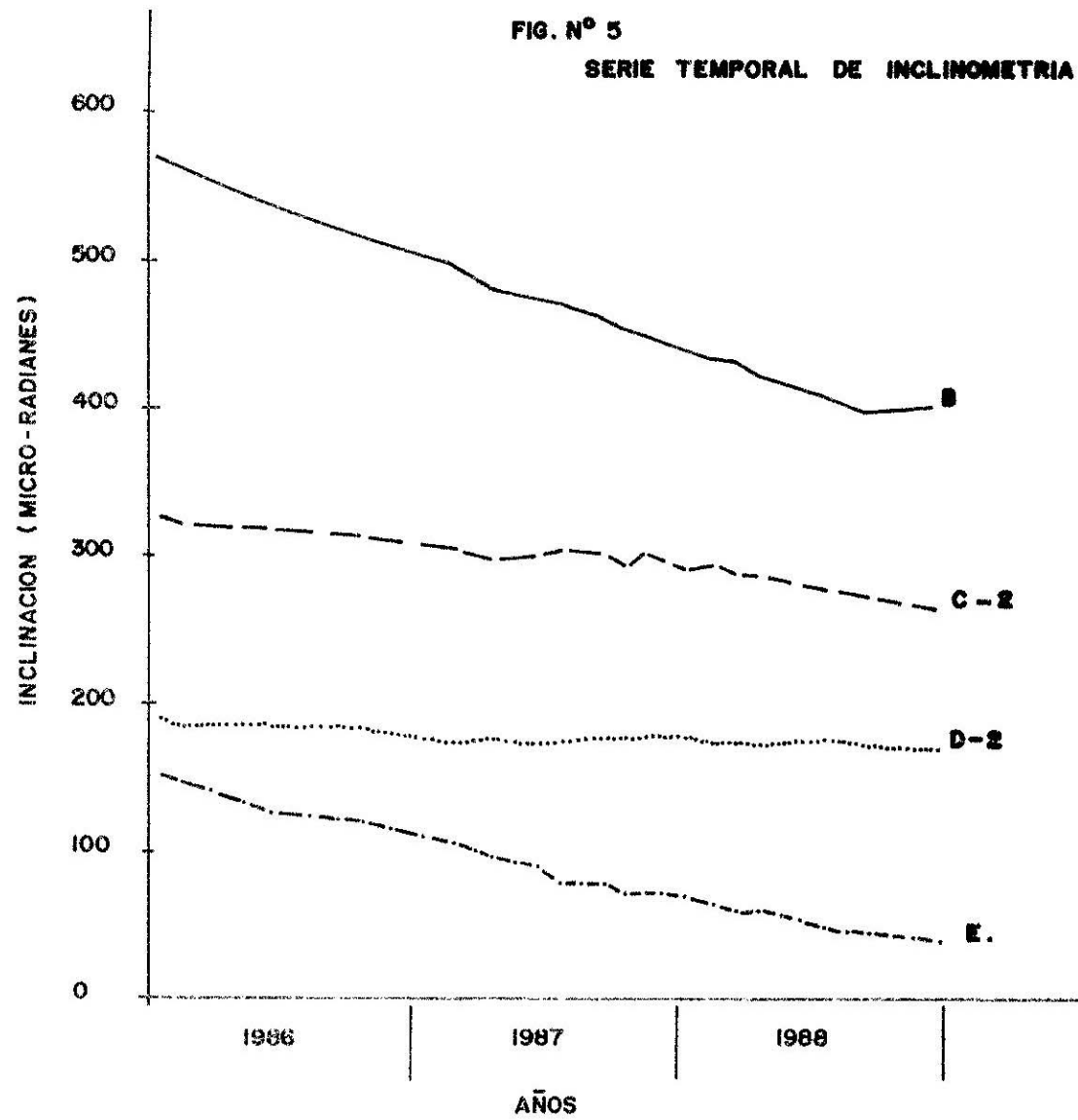
b) El inclinómetro E muestra un comportamiento anómalo con una continua y marcada deflación hacia el NW.

c) El inclinómetro F presenta un comportamiento ligeramente aleatorio, pero con una tendencia general hacia el SW.

d) El resto de los inclinómetros (D,G,I,J,K) presentan un comportamiento aleatorio (movimiento alrededor de la medida original), inferior a 16 microradianes y usualmente menor a 8 microradianes. En la Fig. 1 se muestra tan solo el vector resultante relativo pero, que para efectos prácticos, se les considera como "cero".

FIG. N° 5

SERIE TEMPORAL DE INCLINOMETRIA SECA DEL VOLCAN ARENAL.



e) Referente a las medidas efectuadas en el distanciómetro en las líneas 1 y 2 (con diferentes puntos y controles), se observa que existe igualmente un comportamiento aleatorio, no asociado en su mayoría a actividad volcánica, evidenciándose una ligera deflación en la línea No. 1, mientras que en la No. 2 no se observa ninguna tendencia definida (Figs. 6, 7, 8 y 9; cuadros 1 y 2).

Con base en lo anterior parece concluirse que:

1) No existe un único punto de máxima deformación, de acuerdo a los vectores resultantes.

2) Se puede decir que, con centro en un punto ubicado a un kilómetro al norte del antiguo cráter A, se establece un círculo imaginario de 2.5 Km de radio, a partir del cual las deformaciones se pueden considerar como ínfimas.

El establecimiento por parte de Van der Laat (1988) de un modelo de cámara magmática a 800-1500 m de profundidad, con un volumen de $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ para un radio de aproximadamente un kilómetro, basado en una fuente puntual esférica (sensu Mogi, 1958), no nos parece admisible, o merece una revisión, puesto que en la figura 5 de su trabajo, se observa que la mayor parte de los inclinómetros del OVSICORI-UNA se ubican a más de 2800 m de distancia del cráter C (superior), es decir, fuera del área de mayor y real deformación, descrita previamente. Así, las curvas teóricas de dicha figura prácticamente se construyen con un banco de datos que se pueden considerar similares y poco representativos (fuera del área de mayor deformación) y tan solo los inclinómetros C-Deste y B-Deste se ubican dentro de ella. Con base en lo anterior, la afirmación de Van der Laat (1988) referente a las correlaciones estadísticas entre 0.7 y 0.9, que a su criterio indican que existe una sola fuente de presión interna y que la alteración de los datos por efectos locales es mínima, no nos parece acertada.

Nosotros consideramos, al igual que Wadge (1983), que gran parte de estas deformaciones (inclinómetros B y C) son en su mayor parte producto del enorme peso de las coladas de lava (en algunos sectores con espesores superiores a los 100 m), para un volumen total de $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Borgia et al., 1988) y en cierto grado a la configuración geométrica (tamaño, número de hitos) de los inclinómetros y errores en las medidas. La deformación extraña del inclinómetro E puede ser el producto del efecto de la repentina depositación de la avalancha ardiente de 1975, en el cauce del río Tabacón, con un espesor 10 m para un volumen de 1 a $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ según Matumoto & Umaña (1976), o a un efecto local indeterminado.

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS BASICOS
VIGILANCIA VOLCAN ARENAL
MEDICION DE DISTANCIAS INCLINADAS CON DM NIKON ND-31

LINEA I

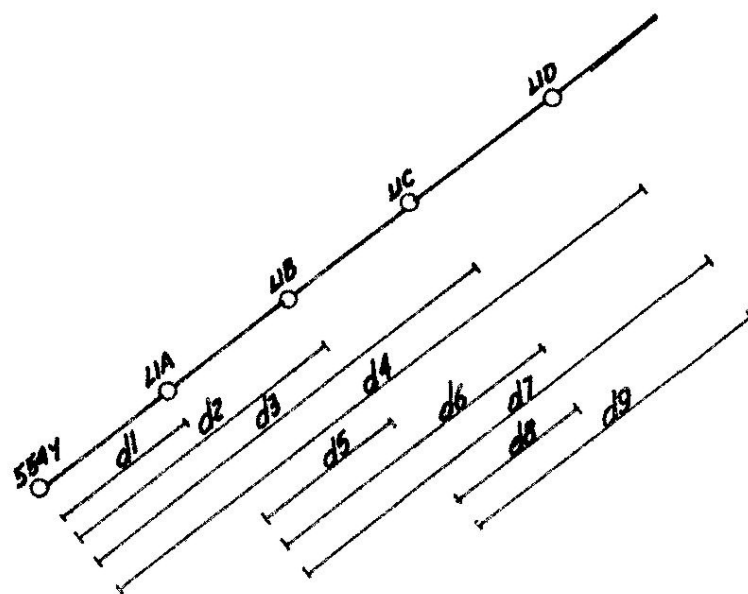


FIG. 6.

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS BASICOS
VIGILANCIA VOLCAN ARENAL
MEDICION DE DISTANCIAS INCLINADAS CON DM NIKON ND-31

LINEA 2

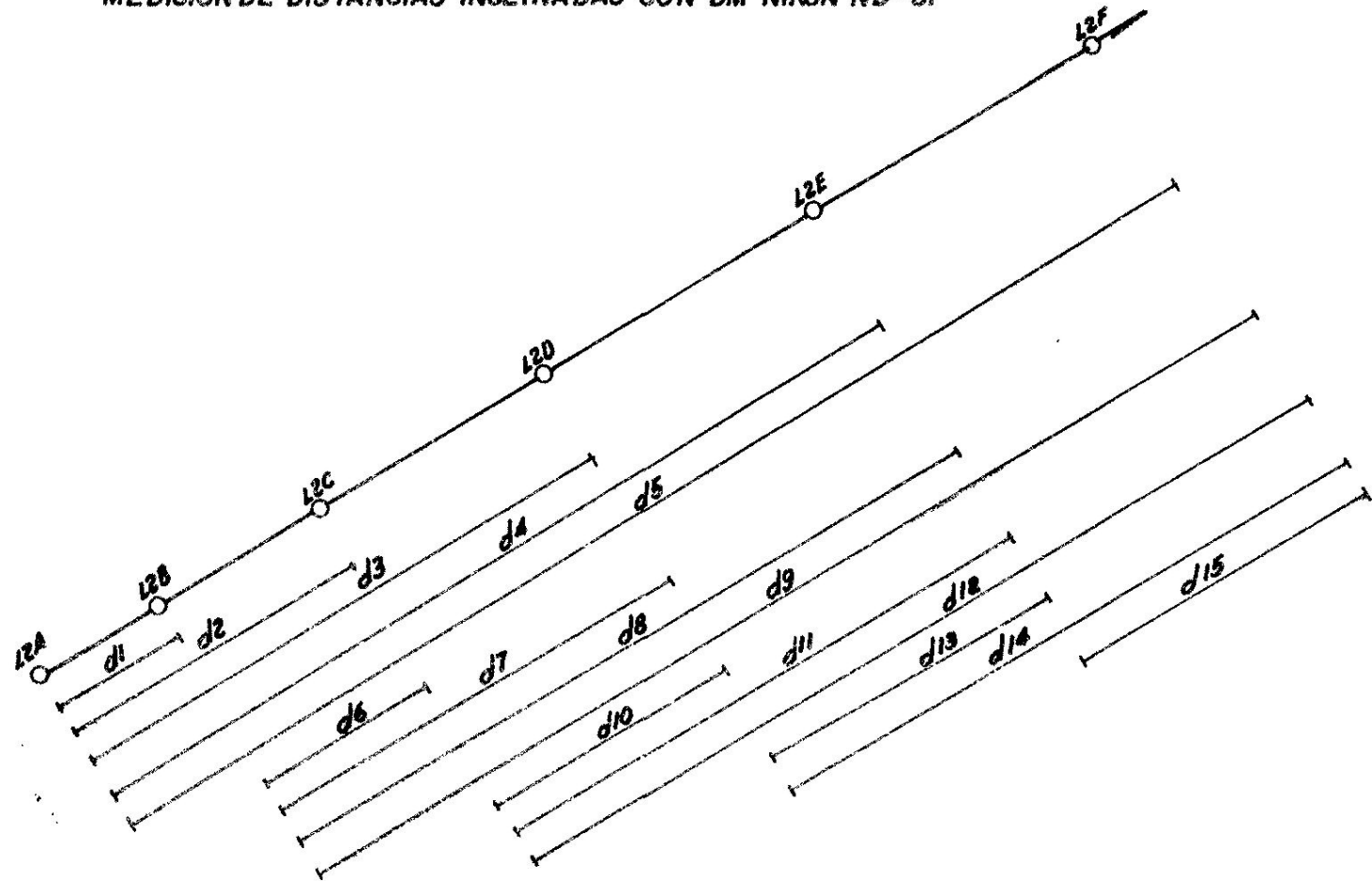
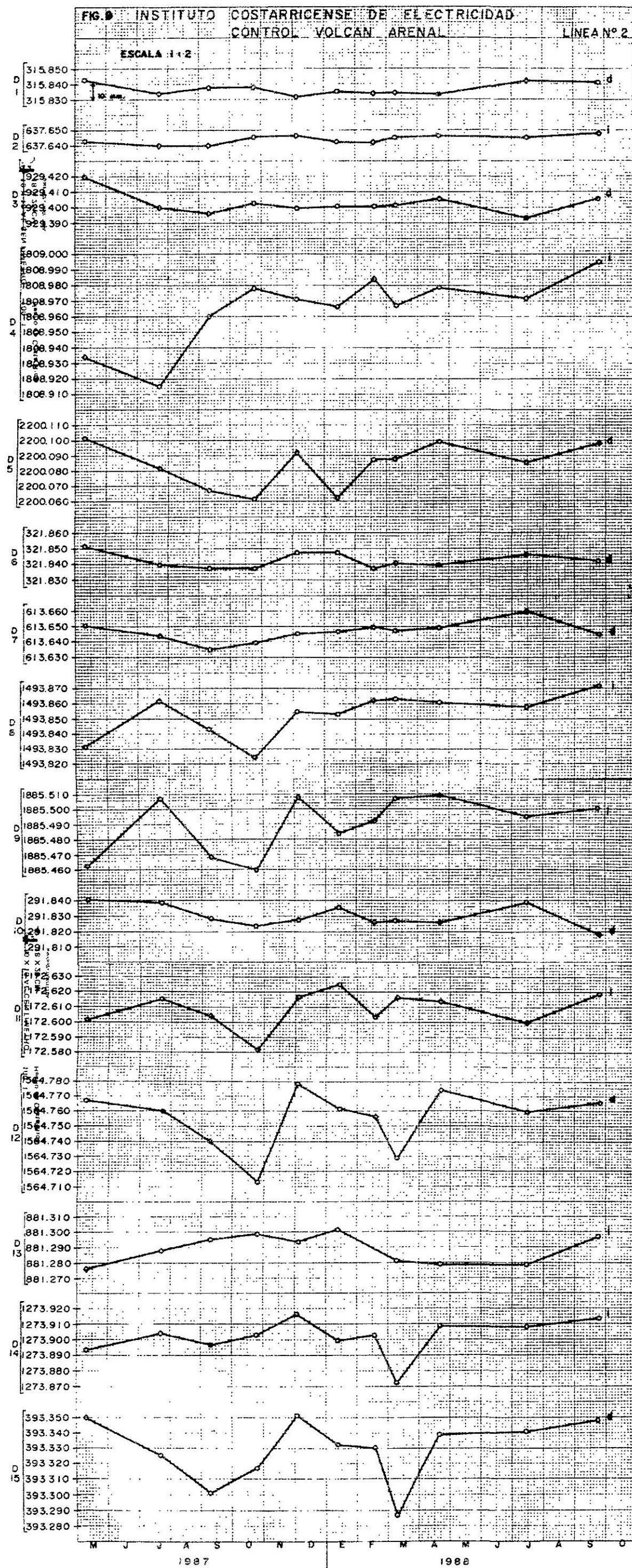


FIG. 7.



554Y: 273917,711 461785,417

L10: 272969,054 460607,573

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS BASICOS
VIGILANCIA VOLCAN ARENAL

LINEA I

CAMPAÑA N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
FECHA	9-5-87	21-7-87	10-9-87	23-10-87	4-12-87	13-1-88	18-2-88	9-3-88	21-4-88	14-7-88	23-9-88		
LINEA ↓													
d1:554Y-L1A	303,677	303,660	303,661	303,656	303,660	303,659	303,656	303,657	303,655	303,671	303,652		
d2:554Y-L1B	594,664	594,662	594,659	594,658	594,662	594,659	594,661	594,664	594,662	594,676	594,647		
d3:554Y-L1C	829,631	829,629	829,627	829,628	829,640	829,630	829,640	829,636	829,627	829,624	829,616		
d4:554Y-L1D	1220,528	1220,524	1220,506	1220,542	1220,513	1220,522	1220,525	1220,515	1220,501	1220,513	1220,473		
d5:L1A-L1B	291,044	291,028	291,026	291,031	291,030	291,031	291,024	291,041	291,030	291,009	291,040		
d6:L1A-L1C	526,018	526,006	526,004	526,010	526,016	526,013	526,016	526,015	526,011	525,995	525,995		
d7:L1A-L1D	918,081	918,130	918,100	918,140	918,102	918,124	918,111	918,107	918,107	918,096	918,085		
d8:L1B-L1C	234,987	234,968	234,971	234,971	234,975	234,974	234,975	234,975	234,973	234,982	234,978		
d9:L1B-L1D	628,628	628,621	628,591	628,627	628,577	628,606	628,610	628,588	628,594	628,600	628,562		

CUADRO I

L2A: 272024, 982 455637, 341

L2F: 271376, 739 457723, 582

CUADRO 2

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS BASICOS VIGILANCIA VOLCAN ARENAL

LINEA 2

CAMPAÑA N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
FECHA	9-5-87	21-7-87	10-9-87	23-10-87	4-12-87	13-1-88	18-2-88	9-3-88	21-4-88	14-7-88	23-9-88		
LINEA ↓													
d1=L2A-L2B	315.843	315.834	315.835	315.838	315.832	315.835	315.834	815.834	816.833	315.842	315.841		
d2=L2A-L2C	637.643	637.640	637.640	637.645	637.646	637.642	637.642	637.645	637.646	637.645	637.648		
d3=L2A-L2D	929.420	929.399	929.396	929.402	929.399	929.400	929.400	929.401	929.405	929.393	929.405		
d4=L2A-L2E	1808.934	1808.916	1808.960	1808.978	1808.971	1808.966	1808.984	1808.967	1808.979	1808.972	1808.995		
d5=L2A-L2F	2200.102	2200.082	2200.067	2200.061	2200.092	2200.082	2200.087	2200.088	2200.099	2200.086	2200.098		
d6=L2B-L2C	321.851	321.839	321.837	321.837	321.847	321.847	321.837	321.840	321.839	321.846	321.841		
d7=L2B-L2D	613.650	613.644	613.635	613.639	613.645	613.646	613.649	613.647	613.649	613.660	613.644		
d8=L2B-L2E	1493.831	1493.862	1493.843	1493.824	1493.835	1493.853	1493.862	1493.863	1493.861	1493.865	1493.871		
d9=L2B-L2F	1885.462	1885.507	1885.468	1885.460	1885.508	1885.484	1885.492	1885.507	1885.509	1885.495	1885.501		
d10=L2C-L2D	291.840	291.838	291.828	291.824	291.828	291.835	291.826	291.827	291.826	291.839	291.818		
d11=L2C-L2E	1172.601	1172.615	1172.604	1172.582	1172.617	1172.625	1172.604	1172.616	1172.614	1172.620	1172.619		
d12=L2C-L2F	1564.767	1564.760	1564.740	1564.713	1564.779	1564.762	1564.766	1564.729	1564.774	1564.760	1564.766		
d13=	881.276	881.287	881.295	881.299	881.293	881.302	881.282	881.295	881.279	881.279	881.298		
d14=	1273.893	1273.904	1273.897	1273.903	1273.917	1273.900	1273.903	1273.873	1273.909	1273.909	1273.914		
d15=	393.350	393.326	393.301	303.317	303.351	393.333	393.331	393.288	393.340	393.342	393.349		

Resulta interesante señalar que el punto de máxima deformación aparente (centro del área "circular" con deformación) corresponde con el antiguo y supuesto cráter E que dió origen a la colada de Tabacón hace algunos siglos atrás (véase Borgia et al., 1988).

En la Fig. 4 se muestran los diferentes modelos de la estructura interna del Arenal planteados por diferentes autores. Nosotros nos inclinamos más por un conducto volcánico continuo, alimentado por una cámara magmática profunda subcortical (Wadge, 1980; Reagan et al., 1987). Dicha chimenea en su parte superior podría tener diámetros diferentes y a su vez poseer una envoltura de vapor-agua alimentada por acuíferos más o menos profundos.

El tamaño de la envoltura hidrotermal va a depender de la recarga y flujo del acuífero en el tiempo a través del aparato volcánico y del flujo de calor del conducto eruptivo activo y de aquellos en vías de enfriamiento (dique radial). La existencia de esta capa de líquido-vapor de agua y de un conducto posiblemente con diferentes diámetros, puede no solo explicar los diferentes temblores y su estabilidad temporal, sino también las pequeñas inflaciones. Un fenómeno similar se observó en la isla Guadalupe (Indias Francesas occidentales) en 1976 (West et al., 1978).

La práctica ausencia de sismos tipo A y la inexistencia de fumarolas en los flancos del volcán no apoya, en principio, un modelo de cámara magmática somera, y mucho menos con las dimensiones propuestas por Matumoto (en Alvarado et al., 1988) en una región tectónicamente activa y muy fracturada.

CONCLUSIONES:

La mayoría de los autores que han trabajado en el volcán Arenal han utilizado para su análisis el trabajo clásico de Mogi (1958), el cual posee como limitación el hecho de que su modelo es para una fuente puntual de dilatación y que requiere precisamente de un cambio uniforme de presión en un reservorio esférico (situación infrecuente a juzgar por los terrenos subvolcánicos erosionados), bajo la condición de que el tamaño del mismo sea más pequeño que a la profundidad a la cual se encuentra (Walsh & Decker, 1971; Dietrich & Decker, 1975).

De todo lo anterior expuesto, en el presente trabajo se desprende que no es evidente la existencia de una cámara magmática superficial en el Arenal y que pueden haber un sinnúmero de factores que pueden estar alterando los datos e interpretaciones obtenidas a partir de los inclinómetros, en particular el campo activo de coladas de lava y en menor grado

las condiciones hidrogeológicas, geotérmicas y geológicas en general. Se requieren de estudios geofísicos para definir o descartar la presencia de un reservorio de magma somero bajo el Arenal o de una red más amplia de inclinómetros.

En vista de lo anterior, parece ser que, por el momento, solamente resulta interesante para la vigilancia y prevención en el Arenal, los cambios superiores a 10 micro-radianes/mes, tal y como se ha observado en otros volcanes (Endo et al., 1974).

AGRADECIMIENTOS:

Se agradece las interesantes discusiones con William Melson (Smithsonian Inst., Washington D.C.), Eysteinn Tryggvason (Nordic Volcanological Inst., Islandia), Andrea Borgia (Jet Propulsion Lab., Pasadena) y Norman G. Banks (U.S.G.S.). La información brindada por los personeros del Observatorio Vulcanológico de Colombia (OVC) y por Arnold T. Okamura (Hawaii Volcano Observatory) en 1986 fue de gran valor. Igualmente agradecemos la colaboración del colega Rafael Barquero y la elaboración de los dibujos se la debemos a Manuel Gutiérrez.

REFERENCIAS:

Alvarado G E, Matumoto T, Borgia A, Barquero R (1988). Síntesis Geovulcanológica del Arenal (Costa Rica): 20 años de continua actividad eruptiva (1968-1988). Bol. Vulc. del Arenal (OVA-ICE), 1 (1):1-55 págs. San José.

Borgia A, Poore C, Carr M J, Melson W G, Alvarado G E (1988). Stratigraphic, structural and petrological aspects of Arenal-Chato volcanic system, Costa Rica: Evolution of a young stratovolcanic complex. Bull. Volcanol. 50: 86-105.

Endo E T, Ward P L, Harlow D H, Allen R V, Eaton J P (1974). A prototype Global Volcano Surveillance System Monitoring Seismic Activity and Tilt. Bull. Volcanol. 32: 315-344.

Dieterick J H, Decker R W (1975). Finite Element Modeling of Surface Deformation Associated With Volcanism. J. Geophys. Res. 80 (29): 4094-4102.

Matumoto T, Umaña J (1976). Informe sobre la erupción del volcán Arenal ocurrida el 17 de junio de 1975. Rev. Geogr. Inst. Panam. de Geogr. e Hist., 5: 229-315; San José.

Melson W G (1978). Arenal Volcano (summary). En Arenal Project, march 16, Report 4:22-44. Informe interno ICE (inédita).

_____, Umaña J, Evans E (1979) Arenal Volcano, Western Costa Rica. Results of dry tilt Measurements. SEAN Bull., 4(2):13-16.

Mogi, K (1958). Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformation of the ground surfaces around them. Bull. Earth. Res. Inst., Univ. Tokyo, 36 (2):99-134.

Reagan K M, Gill J B, Malavassi E, Garcia M O (1987). Changes in magma composition at Arenal Volcano, Costa Rica, 1968-1985: Realtime monitoring of open-system differentiation. Bull. Volcanol. 49:415-434.

Sawdo R M, Simon I (1969). Tiltmeter installation Arenal volcano in Costa Rica. -7 págs. Informe de Arthur D. Little, Inc. Cambridge, E.U.A. (inédita).

Simon I, Sawdo R M, Saenz R, Melson W G (1970). Preliminary results from tiltmeter recording at Arenal volcano, Costa Rica. -18 págs. Informe de Arthur D. Little, Inc., Cambridge, E.U.A. (inédita).

Van der Laet R (1986). Metodologías geodésicas para la predicción y vigilancia volcánica: Su aplicación en Costa Rica. Rev. CIAF, II (1-3): 90-102; Bogotá.

_____(1988). Deformaciones asociadas al vulcanismo activo de Costa Rica entre 1981 y 1988. 12 págs. Costa Rican Volcanism Workshop, 13-18 de noviembre, Shenandoah Park. (inédita).

Wadge G (1983). The magma budget of Volcán Arenal, Costa Rica, from 1968 to 1980. J. Volcanol. Geoth. Res. 19:281-302.

Walsh J B, Decker R W (1971). Surface Deformation Associated with Volcanism. J. Geophys. Res. 76 (14): 3291-3302.

West F G, Heken G H, Homuth E F, Peterson R W, Crowe B M, Wohletz K H (1978). Tilts Associated with Volcanic Activity Guadelupe, French West Indies, Fall 1976. -10 págs. Los Alamos Sci. Lab., New Mexico. (inédita).

**INFLUENCIA DE LAS MAREAS LUNISOLARES SOBRE EL COMPORTAMIENTO
DEL VOLCAN ARENAL, COSTA RICA.**

Carlos E. Leandro.

Oficina de Geofísica, Instituto Costarricense de Electricidad.
Apdo. 10032, San José, Costa Rica.

Guillermo E. Alvarado.

Sección de Sismología e Ing. Sísmica, Obs. Vulcanológico del
Arenal (OVA, ICE), Apdo. 10032.

RESUMEN.

En el volcán Arenal, activo por más de 20 años desde 1968, parece existir una relación entre las variaciones del campo gravitacional lunisolar sobre la tierra y la actividad del volcán. Un muestrario de la cantidad de sismos volcánicos entre enero y junio de 1987, evidencian que estos incrementan en número hacia los periodos de máximas mareas gravimétricas quincenales. Lo anterior es válido para la mayoría de los periodos precedentes. Asimismo, se ha observado que los mayores eventos eruptivos inician en sitios donde la marea quincenal está en un nivel intermedio, esto es, anterior o posterior a un máximo o a un mínimo gravimétrico. Por último se ha calculado teóricamente, a partir de una función simplificada de la variación de marea diurna, que los cambios más bruscos que debería de sufrir el sistema magnético con todas sus fases dentro de un conducto o cámara, se deber dar aproximadamente cada 3 horas posterior a un máximo o a un mínimo gravimétrico con una duración de la crisis de más de una hora. Por ello, consideramos que no resultaría difícil encontrar una buena correlación entre la marea diurna y las señales sísmicas, caso que se demuestra en parte para el Arenal y que podría aplicarse a otros volcanes. Finalmente, la eficacia del efecto mareal sobre un sistema volcánico, en general, va a depender de las características geo-vulcanológicas del volcán, por ello, deberá en lo futuro establecer comparaciones con volcanes similares, para así entender mejor la física del sistema y su real influencia.

ABSTRACT.

There seems to be a relation between the lunisolar gravitational field variations on Earth and the volcano activity at the Arenal volcano, active for more than 20 years, since 1968. A sample of the amount of volcanic earthquakes for the period January-June 1987 show an increase in the number of earthquakes according to the gravimetric maximum tides every 15 days. This is valid for most of the precedent periods. In the same way, it has been observed that the stronger eruptive events start when the two-week tide is on an intermedius level, this is, previous or after a gravimetric maximum or minimum. Also, it has been theoretically

calculated from a simplified function of the variation in the daily tide, that the sharp changes which must happen in the magmatic system, with all its phases inside a conduit or chamber, must take place approximately every three hours after a gravimetric maximum or minimum, with a duration of the crisis of more than one hour. Because of this, we consider that in theory, it should not be difficult to find a good correlation between the daily tide and seismic signals, as it happens particularly for Arenal, and could be use for other volcanoes. Finally, the efficiency of the tidal effect over a volcanic system, in general, will depend on the geovolcanological characteristics of the volcano, because of this, comparisons with similar volcanoes should be done in order to understand better the physics of the system and its real influence.

INTRODUCCION.

Muchos científicos han encontrado una correlación positiva o negativa entre las mareas terrestres y los esfuerzos tectónicos (temblores) o la actividad volcánica. Así, las áreas volcánicas activas pueden mostrar las condiciones más favorables para encontrar posibles evidencias entre deformaciones tectónicas y la variación de los esfuerzos debido a la aceleración periódica de la gravedad terrestre, porque en teoría el reservorio magmático y los conductos eruptivos activos poseen una baja rigidez y viscosidad cuando se les compara con la corteza terrestre normal. Ya desde hace mucho tiempo en Costa Rica, el gobernador español Diego de la Haya (1852) había comentado acerca de una relación entre la fuerte actividad volcánica del Irazú en 1723 con las fases de la luna. El volcán Arenal, ubicado en la parte noroeste de Costa Rica, atrajo la atención científica el 29 de julio de 1968 cuando inició una intensa actividad explosiva, varios siglos después de haber estado en calma, no teniendo así registro histórico previo. Desde entonces, bastantes estudios vulcanológicos se han realizado, remitiendo al lector a los artículos de Alvarado et al. (1988) y de Borgia et al. (1988) junto con sus vastas citas bibliográficas. El presente trabajo trata sobre la relación entre las mareas luni-solares y la actividad volcánica (sísmica y eruptiva) del Arenal para un período específico de los primeros seis meses de 1987, aunque su comportamiento perfectamente se puede extrapolar a varios años atrás, tal y como lo demuestran Güendel (1978), Alvarado & Barquero (1987) y en el presente trabajo para diferentes períodos. Además se efectúan algunos comentarios y demostraciones sobre la posible influencia de las mareas en la actividad horaria del volcán y en los períodos de fuertes explosiones. Para ello se estudiarán aquellos efectos relacionados tanto a mareas diurnas como a mareas quincenales. En el primer caso, se analizará la influencia en la ocurrencia de los temblores. En el segundo, la relación entre el número de sismos volcánicos y los principales períodos eruptivos con los máximos y mínimos de mareas quincenales.

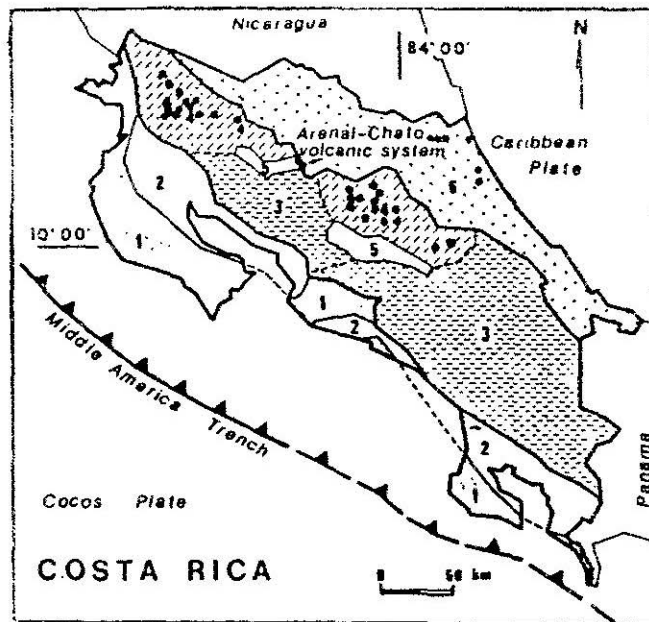


Fig.1. Mapa esquemático de la Geología de Costa Rica. (1) Complejo básicos desde el Cretácico hasta el Terciario Medio. (2) Cuenca Terciaria (3) Cordillera volcánica Terciaria. (4) Cordillera volcánica activa del Cuaternario. (5) Cuenca Intra-Arco. (6) Llanuiras del Caribe.

La muestra obtenida para el número de sismos volcánicos comprende desde enero hasta junio de 1987, con base en el registro continuo de la estación sismológica permanente (FOR) ubicada a 4 km sobre el flanco este del volcán.

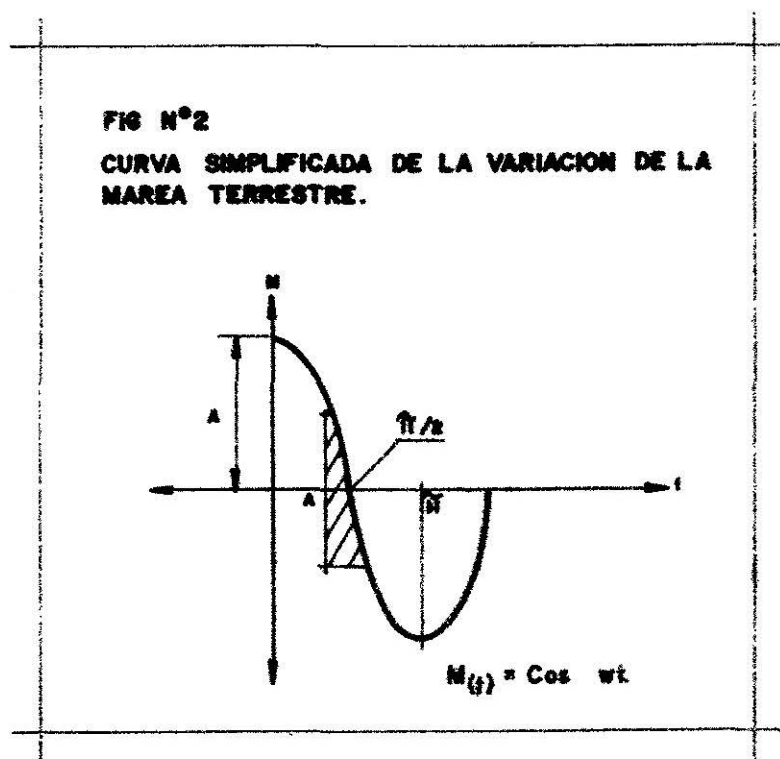
Las variaciones gravimétricas teóricas por influencia lunisolar han sido obtenidas por medio de un programa confeccionado por Bob Jachens y revizado por Shri Singh en agosto de 1976, el cual analiza la aceleración mareal por efecto del sol y de la luna en un punto de la corteza de una tierra rígida en un tiempo electo. Güendel (1978) efectuó un primer trabajo en el cual se intentaba encontrar alguna relación entre las mareas y la actividad del

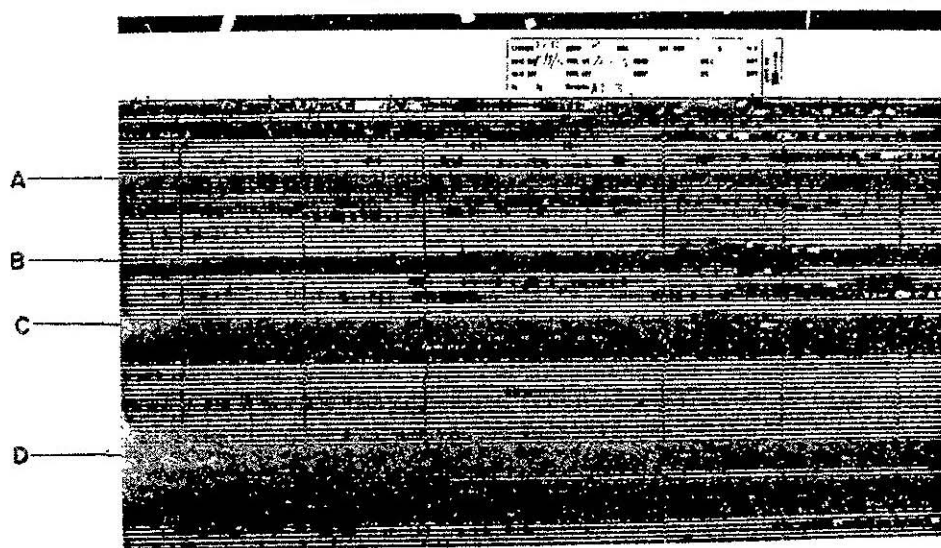
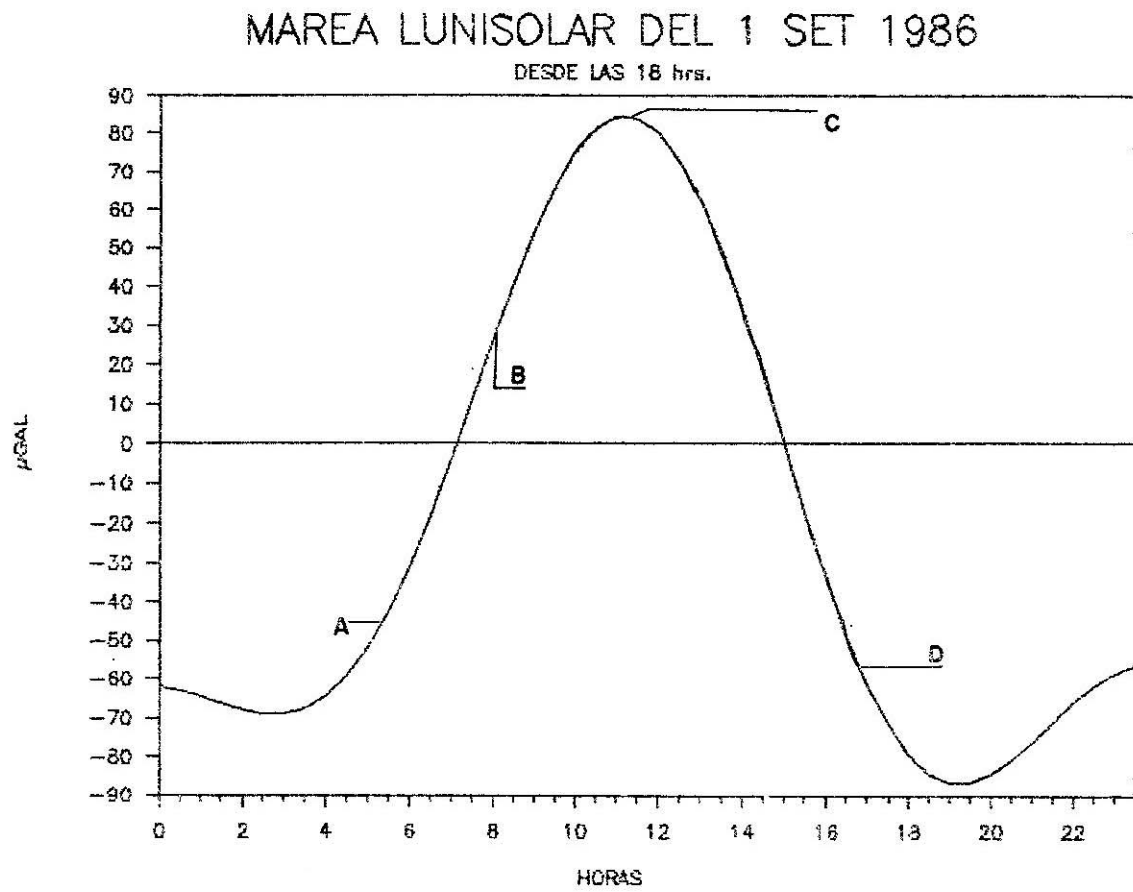
Arenal. Utilizando datos de la Red Sismológica del Arenal del ICE (Observatorio Sismológico de Chiripa) en un corto intervalo entre el 19 de agosto y el 9 de setiembre de 1975 (22 días en total), él encontró una significativa correlación entre la actividad de microtemores y la componente diurna de la marea terrestre. Agrega además, que la características geotectónicas del área también pueden ser de gran importancia para establecer alguna correlación entre las mareas, como un posible mecanismo activador, y la actividad volcánica, tal y como se ha propuesto para otras regiones volcánicas.

RELACION ENTRE LAS MAREAS TERRESTRES Y LA ACTIVIDAD VOLCANICA.

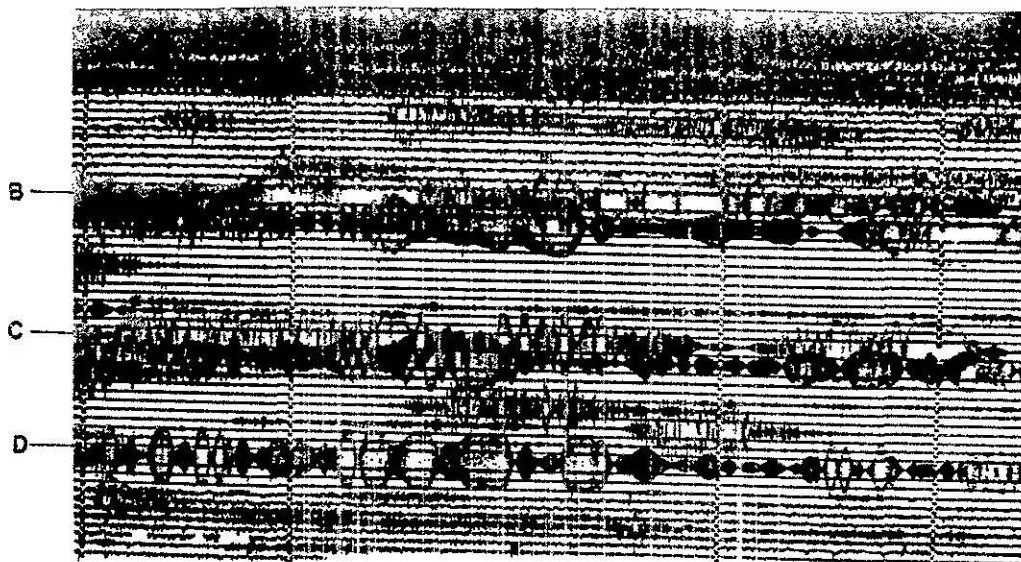
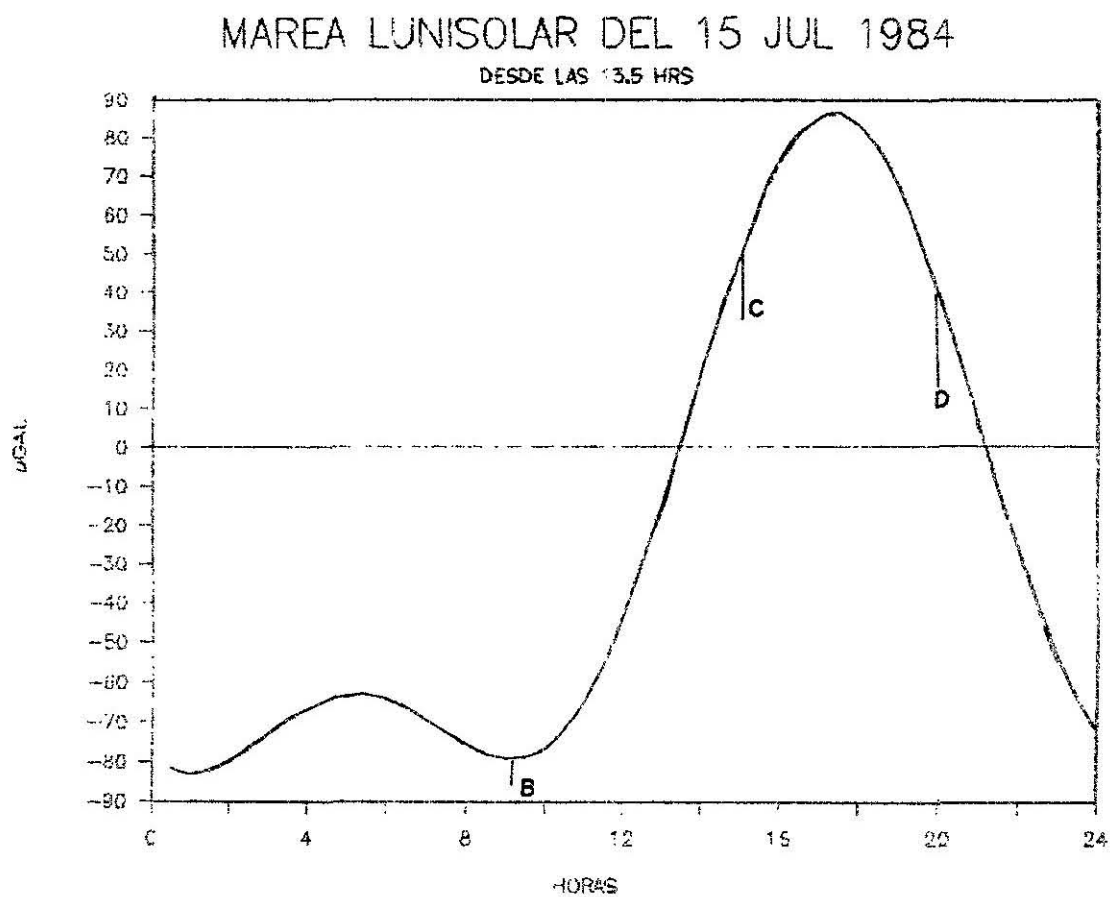
a) Efectos de las Mareas Diurnas.

Los esfuerzos de la marea en la corteza son del orden de 10^{-2} bar de magnitud, valor definitivamente pequeño comparado con el total de esfuerzos actuando en el interior del volcán. Su posible influencia debe ser entendida solo como un mecanismo activador dentro de un sistema ya de por sí inestable (Emter et al., 1985). En muchos registros sismográficos se ha observado que la actividad de trémores ocurre en fases o intervalos. En la fig. 2 se observa un registro sísmico conteniendo trémores de alta frecuencia marcados en diferentes intervalos. Es notable como el inicio de un período de trémores no está ligado a un punto específico sino que su ocurrencia es aleatoria. No obstante, se esperaría que esta actividad refleje una ocurrencia en los puntos en donde la variación de la marea es máxima; esto es cuando la curva está cercana al valor de cero μ gal:





TREMORES DE ALTA FRECUENCIA



Esto se puede demostrar a través de la fórmula simplificada que define la curva de la marea dada por la función:

$$M = A \cos wt \quad \text{por 1} \quad (1)$$

donde:

A es la amplitud
t es el tiempo
w es la frecuencia angular.

Para conocer sus variaciones en el tiempo, derivamos con respecto a esta unidad y obtenemos que:

$$\frac{dM}{dt} = wA \sin wt \quad (2)$$

Así se desprende de lo anterior que la fórmula 2 se iguala a cero cuando $wt = \pi, 2\pi, \dots n\pi$ para $n \in \mathbb{N}$. En estos puntos la cámara magmática debería experimentar un cambio pequeño pero brusco en el campo gravitacional y consecuentemente el sistema eruptivo también. Esto se puede reflejar en un cambio de presiones que se consideran como posibles mecanismo activador. Dada la compleja reología del magma, es de esperar que los efectos de tales cambios sean retardados y se manifiesten hacia los máximos o mínimos valores de marea. En la fig 3, se muestra un área sombreada cuyo valor en el eje de las ordenadas corresponde al de la amplitud, que justamente se hipotetiza que pertenece al máximo esfuerzo en el conducto eruptivo y su fuente alimentadora. Para conocer el tiempo aproximado que toma esta excitación en un δt muy cercano a uno de esos puntos nodales, en donde (1) se iguala a cero, debemos de recurrir a una serie de expansión de Taylor dada por:

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots \quad (3)$$

Sustituyendo 3 en 2, tenemos que:

$$\frac{\delta M}{\delta t} \approx wA \left(wt - \frac{(wt)^3}{3!} + \frac{(wt)^5}{5!} \right) \quad (4)$$

Como antes se mencionó, cuando $wt = \pi$, tenemos una máxima variación. Utilizando este dato en 4, nos resulta que

$$\frac{\delta M}{\delta t} \approx 0.52 wA \quad (5)$$

y como en el área de máxima variación $\delta M \approx A$, entonces

$$\delta t = \frac{T}{2\pi * 0.52} \quad \text{dado que } w = \frac{2\pi}{T} \text{ y } T=12.41 \text{ hrs.}$$

Se obtiene entonces que $\delta t \approx 3:31'$ (tres horas y cuarenta y un minutos, tiempo que dura en barrer el área sombreada de la fig.3). Lo anterior significa que el tiempo que se requiere para alcanzar un máximo desde la mayor variación asumida es de 77 minutos; ya que el cambio entre una marea alta a la baja es de 6 hrs y 14 minutos. Así por ejemplo, Emter et al. (1985) encontró un máximo relativo de eventos en el volcán Etna, (Italia) entre una y dos horas después del mínimo valor de marea, con lo cual la ocurrencia de eventos estaría ligada a un efecto combinado de descompresión y de un rápido cambio en el valor de la gravedad. De igual manera, estos investigadores no hallaron ninguna correlación entre la frecuencia de eventos tipo B y las mareas para el Stromboli (Italia).

b) Efecto de la Marea Quincenal

La fig. 4 muestra las mareas lunisulares quincenales de enero a junio de 1987. Las épocas de máximos corresponden a las lunas nuevas o llenas (novilunios o plenilunios) y las épocas de mínimos corresponden a lunas medias (cuarto menguante o cuarto creciente).

Adjunto a estas mareas están el número de sismos por día y una traza filtrada de ellos. Es visible que estos sismos volcánicos guardan cierta afinidad con los máximos gravimétricos, esto es que su máxima ocurrencia está en o cercana a las épocas donde la luna es nueva o llena aunque esto no es del todo general. El filtro usado para obtener la traza fue:

$$X(i) = \frac{A * X_i + ((X_{i-1} + X_{i+1}) / 2) * B + ((X_{i-2} + X_{i+2}) / 2) * C}{A + B + C}$$

donde $A=100\%$

$B=66\%$

$C=33\%$

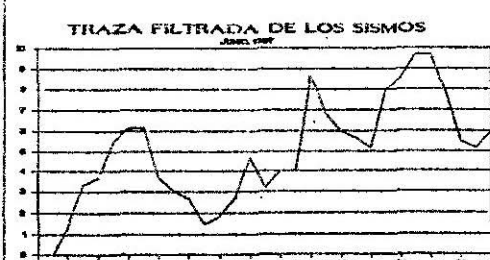
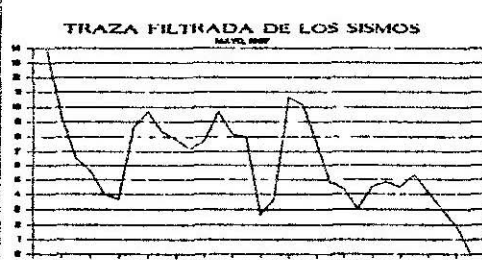
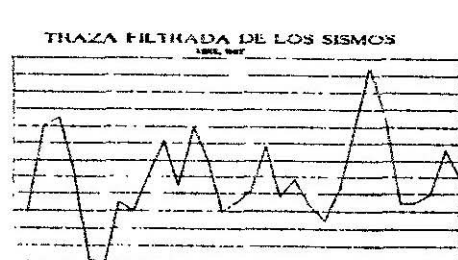
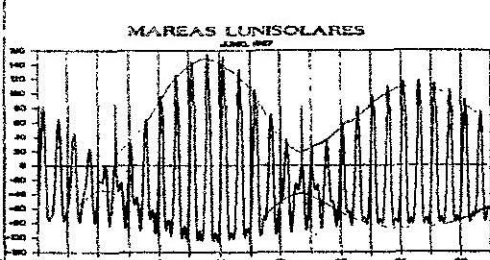
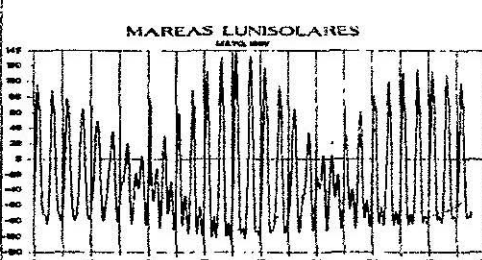
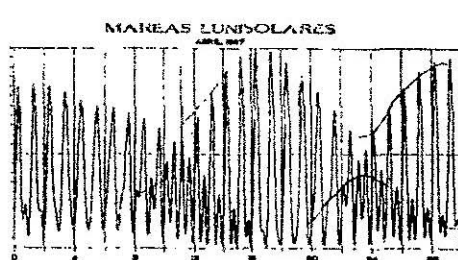
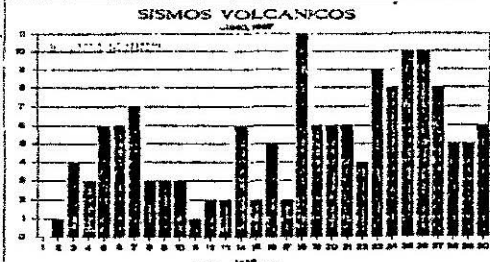
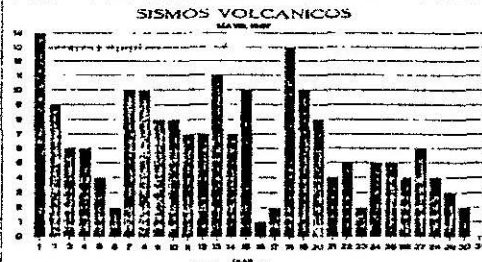
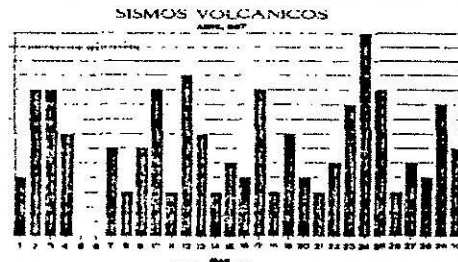
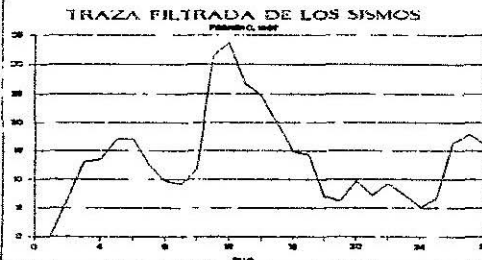
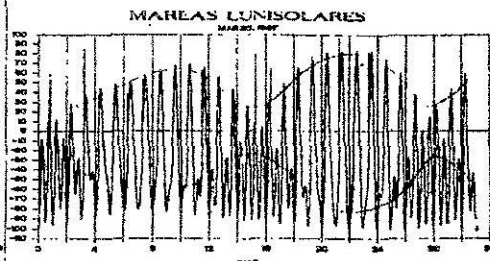
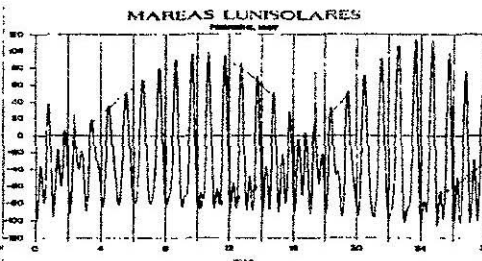
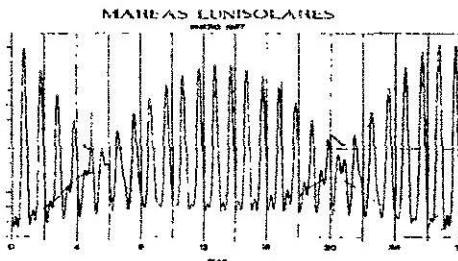
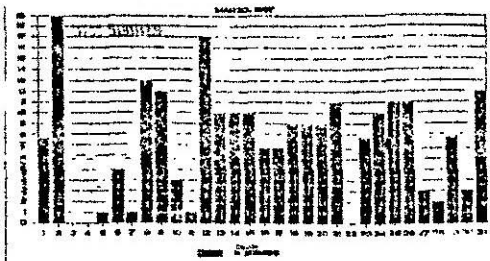
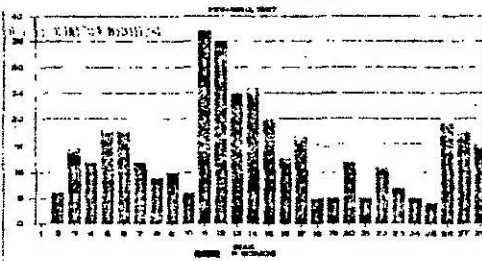
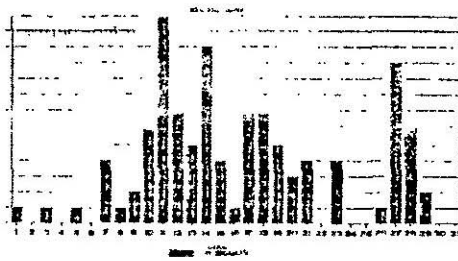
X_i = valor ponderado del número de sismos en un día.

Alvaro & Barquero (1987) encontraron para el período de 1975 y de 1984-1986 que existe una máxima actividad volcánica en correspondencia con las fases de cuarto creciente y luna llena. Sin embargo, al analizar con detenimiento esta información, encontramos que en realidad existe una cierta correlación con las mareas quincenales.

El análisis estadístico de la figura 5 fue realizado clasificando para tal efecto 3 períodos o fases lunares que son:

- 1) Períodos Máximos
- 2) Períodos Mínimos
- 3) Períodos Intermedios

Los períodos máximos corresponden al lapso de tiempo que abarcan dos días anteriores y dos posteriores a los máximos gravimétricos.



De igual forma se han establecido los periodos de mínimos gravimétricos. Los periodos intermedios corresponden a los días existentes entre los máximos y mínimos. El número total de días evaluado es de 181 días con un total de sismos volcánicos correspondientes a 1197. Los porcentajes de días correspondientes para los periodos de máximos, mínimos e intermedios son de 35%, 33% y 32% respectivamente. En dichos días se obtuvo totales de 481, 384 y 332 sismos volcánicos para los diferentes periodos lunares en el orden establecido. Esto va a generar que: a) Un 42% de los sismos volcánicos ocurren en periodos de máximos gravimétricos quincenales.

b) Un 32% de los sismos corresponden con periodos de mínimos gravimétricos quincenales.

c) Los periodos semanales en donde ocurren las aceleraciones gravimétricas intermedias, hay una menor existencia de sismos volcánicos (26%).

Mejía (1986) concluye para el caso del volcán Nevado del Ruiz (Colombia), que no existe una relación fuerte entre la ausencia de actividad sísmica de tipo B y las variaciones de la gravedad debidas a la componente quincenal de las mareas gravimétricas.

c) Relación entre las mareas y los mayores episodios eruptivos.

Güendel (1978), encuentra que tres grandes erupciones del volcán Arenal (29-31 de julio, 1968; 18 junio de 1975) ocurrieron cercanas a la componente mínima de la marea quincenal. La figura 5 muestra algunos de los principales periodos eruptivos de volcán en donde es visible que su ocurrencia no está vinculada a las máximas o mínimas aceleraciones mareales por la influencia lunisolar, sino en situaciones de aceleración intermedia.

Johnston & Mauk (1972), determinaron que la mayoría de las grandes erupciones del Stromboli ocurren durante e inmediatamente después de los mínimos de marea quincenal (luna media) coincidiendo con los resultados de Emter et al. (en prensa) para el Etna. Mejía (1986) no encuentra ninguna relación evidente al respecto en el volcán Ruiz.

CONCLUSIONES

Con base en el estudio realizado para el periodo de registro sismográfico de eventos volcánicos de enero a junio de 1987 y utilizando además información previa de Güendel (1978) y de Alvarado & Barquero (1987), encontramos que existe cierta correlación entre las mareas terrestres y la actividad del volcán Arenal. De todo ello concluimos que:

1) Parece existir una ligera correlación para ciertos periodos cortos de actividad del Arenal entre el inicio de los tremores y las fases máximas, mínimas e intermedias de la marea diurna. Sin embargo, dado el cambio súbito de esfuerzos que se presenta aproximadamente después de 77 minutos de un mínimo o un máximo mareal dentro del albergue magmático (cámara y conducto), resulta

CUADRO Nº 1

ESTADISTICA DE # DE SISMOS CORRESPONDIENTES A FASES LUNARES

FECHA	MAXIMOS	MINIMOS	INTERM.
ENE-87	50	22	24
FEB-87	143	121	121
MAR-87	71	86	71
ABR-87	75	41	25
MAY-87	83	61	51
JUN-87	59	53	40
TOTAL	481	384	332

NUMERO TOTAL DE DIAS = 181
 NUMERO TOTAL DE SISMOS = 1197

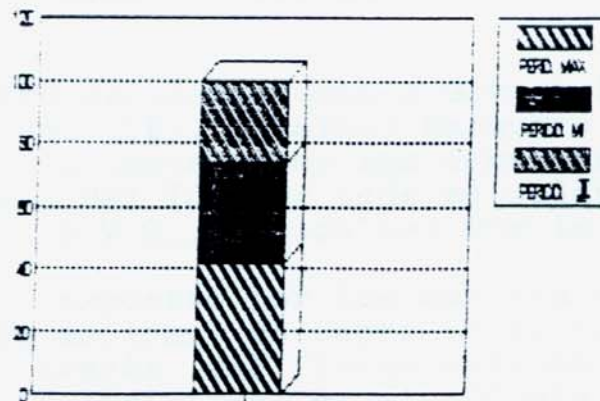
RESULTADOS

PERIODOS MAXIMOS = 42%

PERIODOS MINIMOS = 32%

PERIODOS INTERMEDIOS = 26%

PORCENTAJE DE SISMOS EN RELACION A
 PERIODOS LUNARES



en extremo difícil evidenciar el real efecto de las mareas en el sistema eruptivo del Arenal. Esto explicaría la pobre correlación hallada en otros volcanes.

2) En el caso de las mareas quincenales, se puede hablar de una mayor ocurrencia de sismos volcánicos en épocas donde la aceleración gravimétrica es máxima, o sea, donde la luna es nueva o llena. Esta relación expresada en porcentajes con respecto a los períodos mínimos e intermedios es de 42 : 32 : 26 % respectivamente.

3) Las fases explosivas más importantes del Arenal (julio, 1968; setiembre, 1968; junio, 1975; agosto, 1980; junio, 1984; junio a setiembre de 1987), se verificó que su ocurrencia no está vinculada a períodos de máximas o mínimas aceleraciones mareales, sino en situaciones de aceleración intermedia posiblemente asociado a un retardo del fenómeno volcánico con respecto al gravitacional.

Finalmente, el estudio de las mareas terrestres y su eventual incidencia sobre un sistema volcánico, va a estar íntimamente ligado al tipo de magma (viscosidad, contenido de gases, densidad, etc.), zonación del conducto eruptivo y a la profundidad, volumen, geometría y petrología del reservorio magmático. Por ello, se deberá en lo futuro comparar volcanes vulcanológicamente similares. Es un hecho conocido que las mareas en la corteza terrestre poseen un valor muy pequeño comparado con los esfuerzos generados en el proceso volcánico, por ende, su eventual efecto solo puede ser tomado en términos de un mecanismo que puede activar a un sistema geológicamente inestable.

AGRADECIMIENTOS.

Deseamos plasmar nuestro agradecimiento a German Leandro (Oficina de Geofísica del ICE), a Rafael Barquero (OVA-ICE), a R. Schick (Alemania Occidental) por sus comentarios. Al Departamento de Geología del ICE por toda su colaboración y al Sr. Alvaro Nieto E. (O.V.C., Manizales) por la información brindada.

El presente trabajo fue expuesto por los autores en el "International Workshop of Volcanic Seismology" en Capri (Italia) de 3 al 8 de octubre de 1988, a través del financiamiento de las Naciones Unidas (PNUD) y del ICE, asimismo en el "Costa Rican Volcanism Workshop" en el Shenandoah National Park, Washington D.C. (Estados Unidos) del 13 al 18 de noviembre del mismo año, gracias al auspicio del Instituto Smithsonian bajo el apoyo del Dr. William G. Melson.

REFERENCIAS.

Alvarado GE, Barquero, R (1987) Las señales Sísmicas del volcán Arenal (Costa Rica) y su relación con las fases eruptivas (1968-1986). Ciencia y Tecnología II (I): 15-35; San José.

Alvarado GE, Matumoto T, Borgia A, Barquero R (1988). Síntesis Geovulcanológica del Arenal (Costa Rica): 20 años de continua actividad eruptiva (1988) Bol. Vulc. del Arenal (O.V.A., ICE) 1 (1):4-55 págs., San José.

Borgia A, Poore C, Carr MJ, Melson WG, Alvarado GE (1988) Stratigraphic, structural and petrological aspects of Arenal-Chato volcanic system, Costa Rica: Evolution of a young stratovolcanic complex. Bull. Volcan. 50: 86-105.

De la Haya D (1852). La actividad del volcán Irazú en 1723. Rev. Geogr. Am. Central, 4:203-210; Heredia, Costa Rica. Reproducción en 1977.

Emter D., Zurn W, Schick R, Combardo G (1985) . Search for Tidal Effects on Volcanic Activities at Mt. Etna and Stromboli.

Guendel F. (1978) On relationship between earth tides and volcanic activity at Arenal Volcano, Costa Rica. 32 pags: Tesis. Univ. of Texas.

Johnston MJS, Mauk FJ (1972) Earth Tides and the triggering of eruptions from Stromboli, Italy. Nature.

Mejía JA (1986) Análisis preliminar del efecto de las mareas gravimétricas sobre la actividad del volcán Nevado del Ruiz. CIAF, 11 (1-3):127-145; Bogotá.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS PRINCIPALES SOBRE EL VOLCAN ARENAL
Y AREAS VECINAS

Guillermo E. Alvarado¹

Rafael Barquero¹

Gerardo Soto²

Grace Hidalgo¹

El volcán Arenal tiene más de 20 años de estar activo desde que despertó en la mañana del 29 de julio de 1968, después de varios siglos de tranquilidad. Desde ese momento, la comunidad científica volvió su mirada hacia este estratovolcán, un laboratorio abierto hacia los vulcanólogos. Previamente, se le mencionaba someramente en los libros de geografía, y en notas geológicas, considerándosele en algunos casos meramente como un cerro. Quizás la primera mención y descripción de este coloso corresponde al relato del viaje y visita pastoral de Monseñor Monestel (Obispo de Alajuela) realizada en 1923 a los indios Quatusco (malekus).

El ICE en 1965 inició los estudios geológicos en la región de Arenal para una gran obra de ingeniería que se vería plasmada en 1978 con el actual Complejo Hidroeléctrico de Arenal-Corobici que aporta más del 50% de la energía eléctrica del país. Desde ese entonces se ha escrito decenas de informes internos, publicaciones en revistas nacionales y extranjeras y dictado muchas conferencias aunados a un sinnúmero de reportajes periodísticos. Para que sirva como base a los próximos investigadores del volcán, hemos recopilado las principales referencias bibliográficas sobre él y sus alrededores, hasta 1988.

-
- 1.- Depto. de Geología, Secc. Sismología e Ing. Sísmica, ICE, RSN (ICE-UCR).
 - 2.- Escuela Centroamericana de Geología, Univ. Costa Rica, RSN (ICE-UCR).

BIBLIOGRAFIA

- AGUILAR, C.H., 1977. Introduction to the Archeology of the Arenal Volcano Area Tephrostratigraphy and Cultural Sequences. -National Geogr. Soc. Res. Rep. 1977 Projects: 95-107.
- ALVARADO, G.E., 1984 a Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica. -xii + 186 págs. Tesis de Licenciatura, Esc. Centroamericana de Geología, Univ. Costa Rica; San José
- _____, 1984 b. Plan de trabajo para el estudio vulcanológico en el marco del futuro desarrollo y explotación del proyecto hidroeléctrico Arenal y del proyecto Geotérmico Miravalles - 17 págs.; ICE, Dept. Geología (Informe. Interno); San José
- _____, 1985 a Informe sobre las labores vulcanológicas realizadas en el volcán Arenal y en su evaluación actual (junio 1984-junio 1985).-18 págs. ICE, Dept. Geología (Inf. Interno); San José
- _____, 1985 b. Consideraciones petrológicas de los estratovolcanes de Costa Rica. -Rev. geol. Amer. Central, 2:103-122. San José.
- _____, BARQUERO R., 1987. Las señales sísmicas del volcán Arenal (Costa Rica) y su relación con las fases eruptivas (1968-1986).- Ciencia y Tecnol. 11(1): 15-35; San José.
- _____, PANIAGUA, S., TEJERA, R., 1980. Mapa del Vulcanismo Plio-Pleistoceno -Escala 1:700.000 (mapa preliminar), Escuela Centroamericana de Geología, Univ. de Costa Rica; San José, Costa Rica.
- _____, BARQUERO, R., BOSCHINI, I., CHIESA, S., CARR, M.J., 1986. Relación entre la Neotectónica y el Vulcanismo en Costa Rica.-Rev. CIAF., 11 (1-3): 245-264; Bogotá
- _____, MATUMOTO, T., BORGIA, A., BARQUERO, R., 1988 Síntesis geovulcanológica del Arenal (Costa Rica): 20 años de continua actividad eruptiva (1968-1988). -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 1 (1): 1-55, ICE; San José.
- _____, MATUMOTO, T., BORGIA, A., BARQUERO, R., 1988. Monitoring and Volcanic hazard of Arenal Volcano (Costa Rica): 20 years of continuous activity (1968-1988).-Int. Conf. Geosciences in Development; Nottingham, Inglaterra (resumen).
- _____, ARGUETA, S., CORDERO, C., 1988. Interpretación preliminar de las deformaciones asociadas al volcán Arenal (Costa Rica).-Bol. Obs. Vulc. Arenal, 1 (2): 25-44, ICE; Costa Rica.

- AVILA, G., 1977 Investigaciones realizadas en las redes sismológicas de los proyectos de Arenal y Geotermico. para el periodo diciembre 1976-diciembre 1977 -111 + 18 págs. Inst. Costarricense de Electricidad (ICE), Dept. Geología (Inf. Interno); San José.
- _____, 1978. Investigación y vigilancia del Volcán Arenal, Alajuela, Costa Rica. -40 págs., Inst. Costarricense de Electricidad (ICE), Dep. Geología (Inf. Interno); San José.
- BARDINTSEFF, J-M , 1985 Las nuées ardentes: Petrogenese et volcanologie -393 págs. Tesis doctoral. Bull. PIRPSEV N°109. Paris
- BARQUERO J. (edit)., (1978-1988) Boletín de Vulcanología. - Escuela de Ciencias Geográficas. Bol. Nos. 1-19. Univ. Nacional; Heredia, Costa Rica.
- BARQUERO, R., 1986. Estudio de la actividad sísmica del volcán Arenal. Periodo 1968-1985.-41 págs.; Depto. Geología, ICE (Inf. Interno), San José.
- _____, ALVARADO G., 1986 Arenal Volcano (Costa Rica) Seismic Signals and It's Relation with the Eruptive Phases (1968-1986).-Kagoshima Int. Conf. on Volcanoes. Proceedings: 159-202, Japan
- BENNETT, F.D , RACCICHINI, S., 1977. Las eruciones del Volcán Arenal, Costa Rica.-Rev. Geogr. Amer. Central, 5-6 (I-II): 7-35. Heredia.
- BERGDEING, J.F , 1976 La Fotografía aérea y su aplicación a la Geomorfología de Costa Rica. -126 págs., Escuela de Geografía Univ. Costa Rica, Inst. Geogr. de Costa Rica.
- BIGOT, S., BARQUERO, J , MALAVASSI, R., 1982. Vigilancia hidrogeoquímica del volcán Arenal. Bol. de Vulcanol. 12:2-7; -Esc. Ciencias Geográficas; Heredia, Costa Rica
- _____, BARQUERO, J , 1986. Estudio hidrogeoquímico del volcán Arenal, contribución a la actividad eruptiva. -Bol., de Vulcanol. 17: 7-14; -Esc. Ciencias Geográficas; Heredia, Costa Rica.
- BRAVO, J., 1982. Geomorfología de la Hoja Fortuna (escala 1:50.000). -ix + 451 págs., Tesis de Licenciatura, Esc. de Ciencias Geográficas, Univ. Nacional, Heredia; Costa Rica.
- _____, LINNEMAN, S., MORALES, L.D. 1987 Formation and evolution of lava flows at Arenal volcano, Costa Rica. Internat. Union Geodesy and Geophysics. XIX General Assembly. VS-P7:417 (resumen)

- BORGIA, A. 1987. Shape and structure of Arenal volcano, Costa Rica. -Internat Union Geodesy and Geophysics. XIX General Assembly. (Resumen).
- _____. 1988. Physical aspects of eruptions at Arenal and Poas volcanoes, Costa Rica.-233 pages Tesis doctoral, Princeton Univ.
- _____, POORE, C. 1985. New crater in Costa Rica.-EOS, Trans American Geophysical Union, 64: 540.
- _____, LINNEMAN, S., SPENCER D., MORALES L. D., BRENES J. A. 1985. Dynamics of lava flow fronts, Arenal volcano, Costa Rica. J. Volc. Geotherm. Res 19: 203-225.
- _____, POORE, C., CARR, M. J., MELSON, W. B., ALVARADO, S. E. 1988. Structural, stratigraphic, and petrologic aspects of the Arenal-Chato volcanic system, Costa Rica: Evolution of a young stratovolcanic complex. -Bull. volcanol. 50: 86-105.
- _____, LINNEMAN, S., SPENCER, D., MORALES, L. D., BRENES, J. A. 1989. Dynamics of lava flow fronts, Arenal volcano, Costa Rica. -J. Volcanol. Geoth. Res 19: 203.
- BOSCHINI, I., 1988. Sismos sentidos en Costa Rica durante el año 1987: Enfoque hacia las grandes obras del ICE.-45 pags Dept. Geología ICE (Inf. interno). San José
- BURBACH, G., FROHLICH, C., PENNINGTON, W., MATUMOTO, T., 1984. Seismicity and tectonics of the subducted Cocos Plate. -J. Geophys Res. 81: 4885-4895.
- CARR, M.J., STOISER, R.E., 1977. Geologic setting of some destructive earthquakes in Central America. -Geol. Soc. Am. Bull. 89: 151-156.
- _____, WALKER A.J., 1987. Intra-eruption changes in composition of some mafic to intermediate tephres in Central America. -J. Volc. Geoth. Res. 33: 147-159.
- _____, ROSE, W.I., MAYFIELD, D.G., 1978. Potassium content of lavas and depth to the seismic zone in Central America. -J. Volc. Geoth. Res. 5: 387-401.
- CEVA, J., 1976. El Impacto de la actividad del Volcán Arenal, Costa Rica.-Rev. Geogr. Inst. Panam. Geogr. Hist., 5. México.
- CIGOLINI, C., BORGIA, A., 1979. Consideraciones sobre la viscosidad de la lava y la estructura de las coladas del Volcán Arenal, Costa Rica.-Rev. Geogr. de Amer. Central, 11: 12: 131-140.

- _____, BOGLIOTTI, C., 1984. Phase relationships and "spiculate liquid immiscibility" in Arenal volcano lava flows. Costa Rica: preliminary studies. -Atti della Accademia delle Scienze di Torino, 118:226-236.
- _____, KUDO, A.M. 1987. Xenoliths in recent basaltic andesite flows from Arenal Volcano. Costa Rica: Inference on the composition of the lower crust. -Contrib Mineral Petrol, 96:381-390.
- _____, BORGIA, A., CASERTANO, C., 1984. Intracrateric activity, aa-block lava, viscosity and flow dynamics: Arenal Volcano, Costa Rica. -J. Volc. Geoth. Res., 20: 155-176.
- _____, BORGIA, A., CASERTANO, C., 1984. Intracrateric activity, aa-block lava, viscosity and flow dynamics: Arenal Volcano, Costa Rica. -J. Volc. Geoth. Res. 20:155-176.
- CLIMENT, A., BOSCHINI, I., BARQUERO, P., ALVARADO, G.E., 1986. Estudios sismológicos en zonas de Proyectos Hidroeléctricos y Geotérmicos en Costa Rica. -IV Sim. Latinoamericano de Ing. Sismo-resistente y Sim. de Ing. Estructural: 93-112; San José.
- COMISION PARA LA EMERGENCIA DEL VOLCAN ARENAL, MEMORIA, 1969. -67 págs.
- CHAVES, R., 1969. Características físicas, químicas y mineralógicas de los materiales eructados por el volcán Arenal (Costa Rica). -Inf. Semestral. 1:49-67; -Direcc. Geol. Min. y Petrol., Ministerio de Industrias; San José.
- CHEMINÉE, J. L., DELORME, H., BARQUERO, J., AVILA, G., MALAVASSI, E., GUENDEL, F., 1981. Algunos aspectos físicos y químicos de la actividad de los volcanes Poás y Arenal. -Bol. Vulcanol. 11:12-16; Heredia, Costa Rica.
- _____, SAENZ, R., 1970. Efectos de las erupciones recientes del Volcán Arenal. -Inf. Semestral. Enero-Junio 1970. p.23. San José, Costa Rica.
- CHIESA, S., 1987 a, Estudio de las capas piroclásticas (tefras), del volcán Arenal (Costa Rica), con énfasis en la unidad 20. -73 págs., ICE Dept. Geología, (Inf. Interno); San José.
- _____, 1987 b. La mayor erupción pliniana del Volcán Arenal, Costa Rica. Rev. geol. Amér. Central, 6: 25-41; San José.
- DENGO, G., 1962. Tectonic-igneous sequence in Costa Rica. In: Engel, A.E.J., James, H.L., Leonard, B.F., (eds.). Petrological Studies: a volume to honor A.F. Buddington. Geol. Soc. Amer. 133-161.

- DONDOLI, C., DENGU, G., MALAVASSI, V., E. 1968. Mapa Geológico de Costa Rica. -Escala 1:700.000 (compilation) Direc. Geol. Min. y Petról. San José, Costa Rica.
- FERNANDEZ, R., 1969. Estado de los Volcanes de Costa Rica. -Inf. Sem. Julio-Dic., San José.
- FUNDALI, R.F., MELSON, W.G. 1972. Ejecta velocities, magma chamber pressure, and kinetic energy associated with the 1968 eruption of Arenal volcano. -Bull. Volcanol. 35-2:323-401.
- GEOCONSEIL, 1973. Incidencias del sismo del 14 de abril 1972 sobre el Provento - 13 págs. (Int. Interno. ICE); San José.
- GUENDEL, F., 1978. On the relationship between earth tides and volcanic activity at Arenal Volcano, Costa Rica. M.A. -32 págs. Tesis de Maestría, Univ. of Texas.
- _____, 1986. Seismotectonic of Costa Rica: An analytical view of the Southern Terminus of the Middle America Trench. xii+157 págs. Tesis doctoral, Univ. of California, Santa Cruz, E.U.A.
- _____, MALAVASSI, R. E., 1980. La actividad del volcán Arenal entre los días 15 al 20 de agosto de 1980. -Bol. de Vulcanol. 9:3-4; Heredia, Costa Rica.
- HANTKE G., 1976. Arenal. -Bull. Volcanic Eruptions, 14:58-59.
- HERNANDEZ, J., TOURNON, J., 1978. Analyse chimique des verres volcaniques riches en silice a la microsonde électronique (par utilisation des détecteurs d'énergie des rayons X). -C.R. Acad. Sc. Paris D., 287: 1087-1090.
- ICE, 1972. Datos relacionados con la erupción del volcán Arenal del año 1968. -v + 7 págs. + 1 plano (anexo de Informe Interno); San José.
- KUSSMAUL, S., SPRECHMANN, P., 1982. Estratigrafía de Costa Rica (América Central), II: Unidades Litoestratigráficas Igneas. -V Congreso Latinoamericano de Geología, 1982. Actas, I: 73-79; Buenos Aires, Argentina.
- _____, S., PANIAGUA, S., y GAINZA, J., 1982. Recopilación, clasificación e interpretación petroquímica de las ígneas de Costa Rica Inf. Sem. Julio-Dic. -Inst. Geogr. Nac., 28:17-79; San José.
- LEANDRO, C.E., ALVARADO, G.E., 1988. Influencia, de las mareas Lunisolares sobre el comportamiento del volcán Arenal, Costa Rica. -Bol. Obs. Vulc. Arenal. 1 (2): 45-57; ICE; San José.

- MADRIGAL, R., ROJAS, G., 1980. Manual descriptivo del Mapa Geomorfológico de Costa Rica (escala 1:200 000). -79 págs., SEPSA. Imprenta Nacional. San José
- MALAVASSI R.E., 1979. Geology and Petrology of Arenal Volcano, Costa Rica. -III págs.; Tesis de Maestría. Univ. of Hawaii.
- _____, 1991. Avances en la evaluación del riesgo potencial en el Volcán Arenal. Costa Rica. -Simposio su Rischio sismico e vulcanico, IILA. Roma.
- _____, BARQUERO, J., 1980. Cronología de las coladas de lava del Volcán Arenal. -Boi. de Vulcanol. 15:5. -Esc. Cienc Geogr., Univ. Nacional. Heredia, Costa Rica
- MALAVASSI V, E., MADRIGAL, R., 1970. Reconocimiento Geológico de la Zona Atlántica de Costa Rica. -Inf. Techn. y Not. Geol., año 9. N° 29:12. Direc. Geol. Min. y Petról. San José. Costa Rica
- MATUMOTO T., 1968. Seismological observations at Mt. Arenal and other volcanoes in Costa Rica. -8 págs. Preliminary report (inédita).
- _____, 1976. Prediction of a volcanic eruption implied from seismic data. -Rev. Geogr. Inst. Panamericano de Geografía e Historia. 5:285-293.
- _____, LATHAM, G., OHTAKE, M., UMANA, J., 1976. Seismicity studies in northern Costa Rica. Trans. Am. Geophys. Union, 57: 230. -EOS, Trans. Am. Geophys. Union,
- _____, LATHAM, G.V., 1976. Results from the Arenal Seismic Network. -83 págs. Inst. Costarricense Electricidad, ICE. Dept. Geología (Inf. Interno); San José.
- _____, UMANA, J., 1975. Informe sobre la erupción del volcán Arenal ocurrida el 17 de junio de 1975. -9 págs., Dept. Geología, ICE (Informe Interno), San José
- _____, UMANA, J., 1976. Informe sobre la erupción del Volcán Arenal ocurrida el 17 de junio de 1975. -Rev. Geogr. Inst. Panamericano de Geogr. e Historia. 5:299-313; San José
- _____, UMANA, J.E., 1977. Seismic activity at Volcano Arenal. Costa Rica. -EOS, -EOS Trans. Am. Geophys. Union, 58-6:540.
- _____, T., OHTAKE, M., LATHAM, G., UMANA, J., 1977. Crustal Structure in Southern Central America -Bull. Seism. Soc. -Am., 67:121-135.
- MELSON, W.G., 1982. Alternation between acidic and basic magmas in major explosive eruptions of Arenal volcano, Costa Rica. -Boi. Vulcanol. 14:65-74, Univ. Nacional, Costa Rica (1983)

- _____. 1984. Prehistoric eruptions of Arenal volcano. Costa Rican Vinculos. 10 (1-2): 34-59
- _____. 1986. The cyclical nature of explosive volcanism. A petrological approach to volcano forecasting. -Proceed Workshop volcanic Hazards in California pp 99-118
- _____. 1988. Major Explosive Eruptions of Costa Rica Volcanes: Update for Costa Rica Volcanism Workshop -6 pages; Costa Rica Volcanism Workshop. Washington 14-18 noviembre, 1986. (inédita)
- _____. SAENZ, R., 1973. Volume, energy and cyclicity of eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica. -Bull. Volcanol. 27-3: 415-437
- _____. SAENZ, R., 1969. The 1968 eruption of Volcano Arenal: preliminary summary of field and laboratory studies. Smithsonian Center for Short-Lived Phenomena, Report 7-1968. -Trad. española: La erupción del Volcan Arenal, Costa Rica en julio de 1968.; Rev. Geogr. Amer. Central: 5-6: 35-148, Esc. de Geogr. Univ. Nacional, Costa Rica, 1977
- _____. UMAÑA, J. E., EVANS, E., 1979. Arenal volcano: results of dry tilt measurements. -SEAN Bull. 4, 2:13-16
- _____. SARQUERO, J. H., SAENZ, R., FERNANDEZ, E., 1986. Erupciones explosivas de importancia en volcanes de Costa Rica. -Bol. Vulcanol. 16:15-19. Esc. Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- _____. SARQUERO, J., SAENZ, R., FERNANDEZ, E., D'HEARN, T., JEREZ, D., 1988. Arenal volcano, Costa Rica. Eruption Frequency, Intensity and Types -Costa Rican volcanism workshop. Nov. 15-18; Skyland, Shenendra Nat. Park (inédita)
- MERINO Y CORONADO, J., 1968. Resumen de las Observaciones hechas la Reciente Erupción del volcán Arenal. -Inf. Semestral. Inst. Geogr. Nac., 2: 3-17; Costa Rica.
- MINAKAMI, T., UTIBORI, S., HIRAGA, S., 1969. The 1968 Eruption of Volcano Arenal, Costa Rica. -Bull. of the Earth. Res. Inst., 42: 783-802.
- MIYAMURA, S., 1980. Sismicidad de Costa Rica -190 págs., Ed. Univ. Costa Rica, San José.
- MONTERO, W., 1984b. Informe sismológico del Volcán Arenal, periodo de junio a agosto de 1984. -22 págs. + figs.; ICE, Dept. Geología. (Informe Interno); San José.
- MONTERO, W., 1986. Periodos de recurrencia y tipos de secuencias sísmicas de los temblores interplaca en la región de Costa Rica. -Rev. geol. Amer. Central, 5: 35-72; San José

- MORA, S., 1988. Una revisión y actualización de la clasificación morfotectónica de Costa Rica, según la teoría de la tectónica de placas.- Bol. Vulcanol 12:18-36; Heredia, Costa Rica
- _____, ALVARADO, G.E., MORALES, L.D., 1988. Mapa preliminar de amenazas geológicas de Costa Rica: Su importancia para el desarrollo de la infraestructura civil. Escala 1:500 000. - Primer I Confer. Nac. sobre Desastres Naturales. Univ. Nacional, Heredia
- MORALES, L.D., 1985. Las zonas sísmicas de Costa Rica y alrededores -Rev. Geol. Amer. Central, 3:69-101; San José.
- _____, SOLEY, J. F., ALVARADO, G.E., BORGIA, A., BOTO, G., 1980. Analisis espectral de algunas señales sísmicas y su relación con la actividad de los volcanes Arenal y Poás. Costa Rica -Bol. Obs. Arenal, 1 (2): 1-25. ICE; San José
- ORANDO, L.G., 1986. Estratigrafía de la formación Venado y rocas sobrevacantes (Mioceno-Reciente), provincia de Alajuela Costa Rica -Rev. Geol. Amer. Central, 3:72-104; San José.
- PLAFKER, B., 1973. Field reconnaissance of the effects of the earthquake of April 13, 1973, near Laguna de Arenal, Costa Rica. -Bull. Seism. Soc. Am. 63:1847-1856
- QUIROS, T., 1954. Geografía de Costa Rica -194 págs.; Ministerio de Obras Públicas e Inst. Geogr. de Costa Rica, VII
- REAGAN, M.K., 1962. U-Series Equilibrium and Disequilibrium in Plagioclase from Arenal Volcano, Costa Rica. EOS, 69 (44): 1509 (resumen)
- _____, GILL, J.B., PALAVASSI, E., GARCIA, M.O., 1987. Changes in magma composition at Arenal volcano, Costa Rica, 1968-1985. Realtime monitoring of open - system differentiation -Bull. Volcanol., 48:415-434; Nápoles
- SAENZ, R., 1971. Aparatos volcánicos y fuentes termales de Costa Rica -In: Tecn. y Not. Geol. N° 41:16; Direc. Geol. Min. y Petról.; San José, Costa Rica.
- _____, 1977. Erupción del Volcán Arenal en el año 1968 -Rev. Geogr. Amer. Central, 3:6 149-188; Heredia
- _____, HANTKE C., 1977. Arenal.-Bull. Volcanic Eruptions., 15:32-53.
- SALGUERO, M., 1976. Volcanes de Costa Rica -46 págs. Ed. Costa Rica, San José

- SAWDO, R.M., SIMON, I., 1969. Tiltmeter installation Arenal volcano in Costa Rica. 7 pags. Informe de Arthur D. Little, Inc., Cambridge, E. U. A. (inédita)
- SEAN BULL. 1977-1986 - Vol. 2-13; Washington D. C.
- SHEETS, P. D., MULLER, M., (eds.) 1984. Investigaciones arqueológicas en la cordillera de Tilarán, Costa Rica 1984. -Vínculos, 10 (1-2) : 1-236; San José (1986)
- SIMKIM T., 1968. Mt. Arenal volcanic eruption. Costa Rica, 29 July-3 Aug., 1968. Event Chronology-Smith Center for Short-lived Phenomena
- SIMON, I., SAWDO, R., SAENZ, R., MELSON, W. G., 1969. Preliminary Results from Tiltmeter Recording at Arenal Volcano, Costa Rica -EOS (Trans. Amer. Geophys. Union) 51:440
- _____, I., SAWDO, R. M., SAENZ, R., MELSON, W. G., 1970. Preliminary results from tiltmeter recording at Arenal Volcano, Costa Rica. -12 pags.; Informe de Arthur D. Little, Inc., Cambridge, E. U. A. (inédita)
- STOIBER R., CARR, M., 1973: Quaternary and tectonic segmentation of Central Amer. -Bull. Volcanol., 27: 304-325.
- THORPE, R. S., FRANCIS, P. W., MOORBATH, S., 1979. Strontium isotope evidence for petrogenesis of Central American Andesites - Nature, 277: 44-45
- TOURNON, J., 1964. Amerique Centrale: L' exemple de Costa Rica, desophiolites aux andesites. -in: + 335 pags.; Mem. Sc. Terre, Univ. Pierre et Marie Curie, 49-64. Tesis doctoral: Paris
- TREJOS, J.F., 1959. Geografía de Costa Rica. -374 págs., Imc. Universal, San José Costa Rica
- UMARA, J.E., MAINIERI, A., y MOJICA, E., 1974. Primer informe de progreso al Proyecto de Arenal- vi + 100 págs. + anexos ICE Dept. Geología. (Informe Interno)
- _____, GUENDEL, F., PAUTRE, A., 1979. Contribution d' un barrage dans une zone sismiquement et volcanologiquement active -Bull. Inter. Assoc. Eng. Geol. 20:117-120.
- _____, MAINIERI, A., ALFONSO, P., DE LA TORRE, P., LAPORTE, G., 1975. Informe geológico e viabilidad, Proyecto Arenal, Depart. de Geología, ICE. (Inf. Interno)

- VAN DER BILT, H., PANIAGUA S., AVILA, G., 1976. Informe sobre la actividad del Volcán Arenal iniciada el 17 de junio, 1975. -Rev Geof. Inst. Panamericano de Geogr. e Historia: 5: 295-298.
- VAN DER LAAT, R., 1988. Deformaciones asociadas al vulcanismo activo de Costa Rica entre 1981 y 1988. Costa Rican Volcanism Workshop, Washington. 14-18 noviembre, 1988. (inedito).
- VARGAS G., 1985. La sucesión vegetal primaria en una región de vulcanismo reciente en el Volcán Arenal y sus alrededores, Costa Rica. -Rev Biol Trop., 33: 2: 171-188; San José.
- _____. 1987. Analisis de las Formaciones vegetales y uso del suelo de la cordillera de Tilarán y la cuenca interior del río Bebedero, Costa Rica. -Geotrop., 1 (1): 87-91. San José.
- VILLARI, L., 1984. Vulcano Arenal, Costa Rica. Valutazione preliminare del rischio. -5 pags., Instituto Italo Latino Americano, (IILA) (Informe interno del ICE). Roma 1984.
- WADGE, G., 1981. The magma budget of Volcan Arenal, Costa Rica, from 1968 to 1980. -J. Volc. Geoth. Res., 1: 291-302.
- WAKLER W.A. & ASSOCIATES, 1973. Arenal Hydroelectric Project, Tilarán Earthquake, April 14, 1973. -9 pags. Wakler & Associates, California. (Inf. Interno ICE), San José.
- _____. 1977. Seismicity and design earthquake -Arenal dam. -Cap III, pp-III-1-III (Inf. Interno, ICE).
- WALDRON H., 1968. The 1968 eruption of Arenal Volcano, Costa Rica, 5 pags. -Reporte, U.S. Geol. Surv. - American Embassy, (inedita), San José.

RESUMEN DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCAN ARENAL
DURANTE EL PERIODO 1987-1988

Geól. Rafael Barquero

La actividad del volcán Arenal durante el año 1987 fue de carácter efusivo-estromboliano, con frecuente emisión de gases, cenizas y bloques acompañada por efusión intermitente de lava en bloques desde el crater superior (C), las cuales se emplazaron en los flancos oeste, noroeste, norte y noreste.

Se presentó un incremento importante en la actividad explosiva durante el mes de febrero, registrándose varias explosiones fuertes que pudieron ser detectadas inclusive en la estación sismológica San José (SJS) localizada a 92 Km del volcán. El resto del año la actividad se mantuvo moderada (Fig. 1).

En 1988 la actividad del Arenal continuó en forma similar a la de los años pasados, con cortas coladas de lava fueron extruidas desde el crater superior alternadas por explosiones estrombolianas moderadas a fuertes con un promedio de 5 a 10 por día, de acuerdo a los registros sísmicos. En observaciones de campo realizadas en junio y julio se observó que una nueva colada de lava en bloques se había deslizado por el flanco sur hasta aproximadamente 1 Km del crater C. También se pudo observar la destrucción considerable de bosque debido a avalanchas ardientes que descendieron por el cauce del río Tabacón hasta una distancia de 1.5 km del crater.

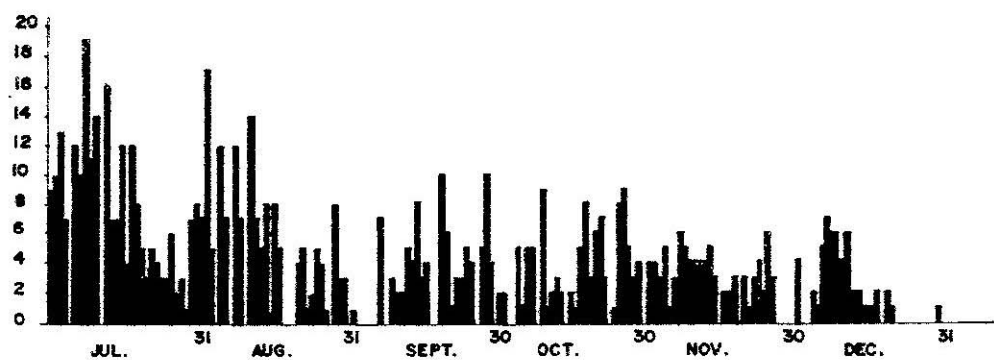
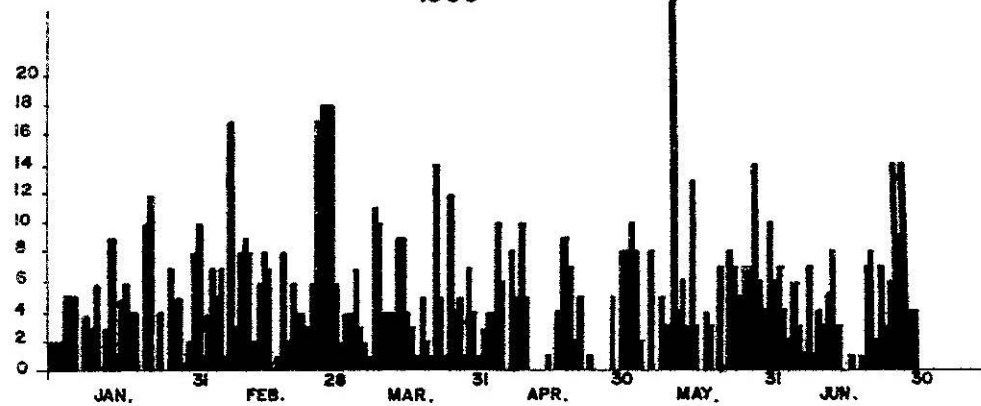
El 6 de julio dos turistas norteamericanos fueron sorprendidos por una explosión súbita mientras se encontraban en las cercanías del crater, uno de ellos falleció por el impacto de los bloques y las altas temperaturas mientras que el otro resultó con heridas de consideración pero pudo escapar con vida.

La actividad efusiva-estromboliana continuó en forma moderada pero intermitente por el resto del año con un incremento importante en el mes de setiembre, cuando se registraron hasta 24 explosiones por día.

En el mes de diciembre nuevamente un grupo de turistas, quienes hicieron caso omiso de las advertencias dadas por los rótulos de prevención, fueron sorprendidos por una explosión al iniciar el ascenso al volcán pero, afortunadamente, no sufrieron ningún percance.

DAILY NUMBER OF VOLCANIC EARTHQUAKES SEISMIC STATION FOR

1986



1987

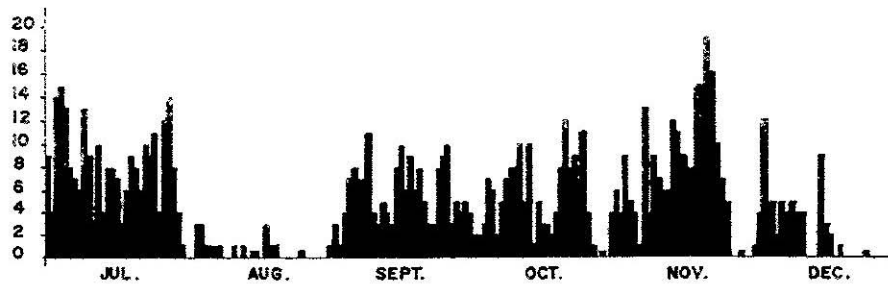
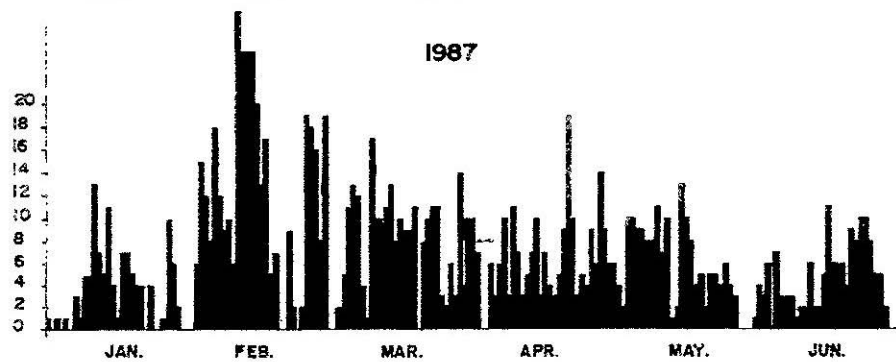


FIG. 1