

ICE  
U.E.N. Proyectos y Servicios Asociados  
C.S. Exploración Subterránea

*Bonquero*  
*2006*

Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica



Foto cortesía de Federico Chavarría Kooper, UNA

## Boletín del OSIVAM

Observatorio Sismológico y Vulcanológico de  
Arenal y Miravalles (OSIVAM)

Año 16-17, N° 28-29  
Agosto, 2006

ISSN 1015-4396

ICE  
U.E.N. Proyectos y Servicios Asociados  
C.S. Exploración Subterránea

Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica

Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico  
de Arenal y Miravalles (OSIVAM)

Editores:  
Guillermo E. Alvarado I.  
Luis A. Madrigal S.

Año 16-17, Nº 28-29

San José, Costa Rica

## Índice

Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles \_\_\_\_\_ i

**Óscar H. Lücke & María I. Sandoval**

Tendencias estacionales en la hidrogeoquímica de los manantiales termales del volcán Arenal (2004-2005) \_\_\_\_\_ 1

**Carlos Vargas, Alexis Vindas & Claudio González,**

Análisis de las cenizas eruptadas por el volcán Arenal durante abril de 1992 a agosto del 2001 y enero del 2004 a mayo del 2006 con respecto al tipo de actividad \_\_\_\_\_ 11

**Sonia Abarca & Raphael Matamoros**

Actividad del volcán Arenal durante el periodo 2004-2006 \_\_\_\_\_ 26

**Pedro Acosta**

Caracterización y variabilidad en el tiempo de la frecuencia de los "chugs" del volcán Arenal entre junio del 2004 y junio del 2005 \_\_\_\_\_ 37

**Waldo Taylor**

La actividad sismotectónica durante el 2004 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles ARCOSA y Tejona (Guanacaste) \_\_\_\_\_ 48

**Guillermo E. Alvarado, María I. Sandoval & Luis A. Madrigal**

Referencias bibliográficas del volcán Arenal al 2006 \_\_\_\_\_ 61

*Las opiniones vertidas por los autores de los artículos son de su propia y entera responsabilidad y no constituyen necesariamente la posición oficial del OSIVAM*

## Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM)

---

Apdo. 10032-1000 San José, Costa Rica

Teléfono: (506) 6955193

Fax: 6955193

e-mail OSIVAM: wtaylor@ice.go.cr

Editores: galvaradoi@ice.go.cr y lmadrigal@ice.go.cr

El Observatorio Sismológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), pertenece al Área de Amenaza y Auscultación Sísmica y Volcánica of Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, Costa Rica), y es miembro de la *World Organization of Volcano Observatories (WOVO)*.

Formalmente, en 1988 se llamó Observatorio Vulcanológico del Arenal (OVA), debido a que, entre otras actividades de monitoreo, estaba dedicado principalmente a la observación del volcán Arenal. Sin embargo, debido a la instalación de una planta geotérmica localizada al pie del volcán Miravalles, la cual inició su operación en 1994, el ICE se abocó al monitoreo del campo geotérmico. Desde entonces, y debido a la unión entre las dos redes sismológicas alrededor de los volcanes Arenal y Miravalles, el OVA pasó a ser el OSIVAM en 1996. Al día de hoy, el OSIVAM está llevando a cabo, además, detalladas investigaciones en el volcán Rincón de la Vieja, lugar de la nueva exploración geotérmica.

### Personal profesional del OSIVAM y afín, así como tareas asignadas

Guillermo Alvarado	Vulcanología y Neotectónica
Waldo Taylor	Sismología y Neotectónica
Álvaro Climent	Ingeniería Sísmica
José Barrantes	Ingeniería Eléctrica
José Cerdas	Geodesia y Topografía
José Fernández	Química
Jochen Bundschuh	Geoquímica e Hidrología

### Personal técnico y asistentes

Luis Anchía	Luis Madrigal
Francisco Arias	Marco Naranjo
Raúl Barquero	María Torres
Dagoberto Boniche	
Guido Calvo	



## Volcanes Arenal, Miravalles y Rincón de la Vieja

El volcán Arenal se localiza en la parte norte de Costa Rica, entre la Cordillera Volcánica de Guanacaste y la Cordillera Volcánica Central. La altura del volcán es de aproximadamente 1720 m sobre el nivel del mar y se eleva cerca de 1100 m del área circundante. Tiene al menos 7000 años de edad y con continua actividad volcánica desde julio de 1968, está caracterizado por erupciones estrombolianas, coladas de lava y flujos piroclásticos, actividad fumarólica y una permanente piscina de lava cratérica, en la actualidad substituida por cuerpos dinámicos.

El volcán Miravalles está localizado en la Cordillera Volcánica de Guanacaste. El edificio volcánico creció en el último medio millón de años sobre una serie de estratovolcanes viejos. La altura del volcán alcanza los 2028 m sobre el nivel del mar y se ubica en la caldera de Guayabo, donde los máximos episodios de ignimbritas se remontan a hace 0,6 millones de años. A pesar de la falta de registros históricos de la actividad volcánica durante los últimos tres siglos, este volcán a presentado actividad secundaria (hornillas, solfataras y fuentes termales) en el Holoceno. Una planta geotérmica está operando en el flanco suroeste del volcán desde 1994 (150 MW).

El volcán Rincón de la Vieja se localiza también en la Cordillera Volcánica de Guanacaste, con un cráter que alcanza los 1895 m de altura sobre el nivel de mar. Es un complejo estrato volcán, cuya actividad consiste principalmente de esporádicas erupciones friáticas y freatomagmáticas con episodios laháricos y fumarolas. Al día de hoy, el ICE está investigando el potencial geotérmico de este volcán y un programa de perforación se inicio desde el año 2002.

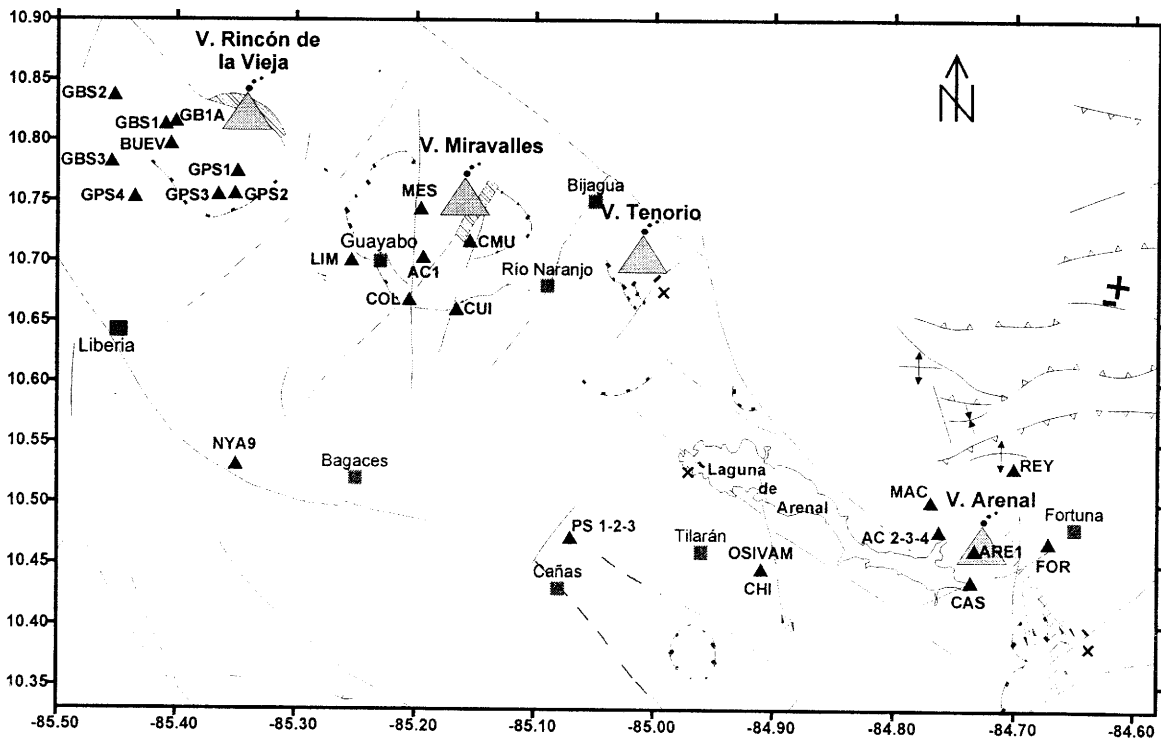


Figure 1. Configuración de la red sísmológica del OSIVAM (The distribution of the OSIVAM seismicological network).

## Instrumentación sísmica

En el norte de Costa Rica el ICE tiene instalada una red sísmológica compuesta por 5 estaciones sísmicas telemétricas digitales (MARS-88 Lennartz con sistema de disparo), y registro continuo de 17 estaciones digitales portátiles (16 REFTEK 130-02 y una COSSAK RANGER) y 7 instrumentos de medición de movimientos fuertes (6 ETNA Kinematics y un MARS-88 Lennartz). La red, cuya configuración se muestra en la figura 1, registra la sismicidad alrededor de los volcanes Arenal, Miravalles y Rincón de la Vieja (ver los detalles en la Tabla 1).

**Tabla 1.** Localización de las estaciones de la red sísmológica del OSIVAM.

Estación	Código	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Elevación (m s.n.m.)
Fortuna (analógica)	FOR	10° 28.10	84° 40.31	384
Fortuna (digital)	FOR	10° 28.10	84° 40.31	384
Castillo	CAS	10° 26.10	84° 44.17	559
Flanco oeste Arenal	ARE1	10° 27.66	84° 43.13	700
Macadamia	MAC	10° 30.01	84° 46.16	832
Chiripa	CHI	10° 26.68	84° 54.59	1029
Monterrey	REY	10° 31.72	84° 42.04	606
Sangregado Cresta	AC2	10° 25.58	84° 45.75	552
Sangregado Berma	AC3	10° 28.58	84° 45.75	520
Sangregado Base	AC4	10° 28.62	84° 45.61	490
Cuipilapa	CUI	10° 39.54	85° 09.96	528
Limal	LIM	10° 41.97	85° 15.24	591
Colonia	COL	10° 40.01	85° 12.35	445
Cabro Muco	CMU	10° 42.92	85° 09.30	979
Mesas	MES	10° 44.53	85° 11.78	631
Casa de Máquinas Miravalles	AC1	10° 42.12	85° 11.66	615
Sandillal Cresta	PS-1	10° 28.12	85° 04.12	150
Sandillal Berma	PS-2	10° 28.12	85° 04.12	130
Sandillal Base	PS-3	10° 28.12	85° 04.12	110
Guarda Parques	GPS1	10° 46.37	85° 20.95	800
Rincón de la Vieja Lodge	GPS2	10° 45.26	85° 21.08	640
Bodega ICE	GPS3	10° 45.22	85° 21.91	580
Torre Cañas Dulces	GPS4	10° 45.10	85° 26.11	580
Hotel Borinquen	GBS1	10° 48.67	85° 24.59	640
Borinquen arriba	GB1A	10° 49.21	85° 23.91	740
Hotel Buena Vista	BUEV	10° 47.89	85° 24.42	720
Las Lilas	GBS2	10° 50.15	85° 27.15	400
Hacienda Las Imágenes	GBS3	10° 46.91	85° 27.33	300
Pijije	NYA9	10° 32.00	85° 22.00	100

De estas, hay 5 estaciones sismológicas alrededor del volcán Arenal (FOR, REY, CAS, MAC AND ARE-1) y una estación adicional más distante (CHI) monitoreando la actividad del volcán y el graven tectónico ocupado por el lago de Arenal. Adicionalmente, 3 instrumentos para registrar movimientos fuertes (AC2, AC3 y AC4) están instalados en la represa de Sangregado (6,5 km oeste del Volcán Arenal). Cinco estaciones sismológicas (LIM, COL, MES, CUI y CMU) y 1 instrumento para registrar movimientos fuertes (AC1) se localizan dentro y alrededor del campo geotérmico de Miravalles. Las señales de 6 estaciones (5 de Miravalles y 1 del volcán Arenal) se transmiten por telemetría al centro principal de registro OSIVAM, en el Cerro Chiripa (cerca de la ciudad de Tilarán). Durante el segundo semestre del año 2004, con 9 estaciones sismológicas (GBS1, GB1A, BUEV, GBS2, GBS3, GPS1, GPS2, GPS3, GPS4) y una estación adicional localizada entre Bagaces y Liberia (NYA9), se inició el monitoreo sísmico de los campos geotérmicos de Las Pailas y Borinquen en los flancos del volcán Rincón de la Vieja. Por último, 3 instrumentos para la detección de movimientos fuertes (PS 1, PS2 y PS3), fueron instalados en la represa de Sandillal. Los sensores utilizados son LE-3D, periodo corto y con un factor de amortiguamiento de 0,7.

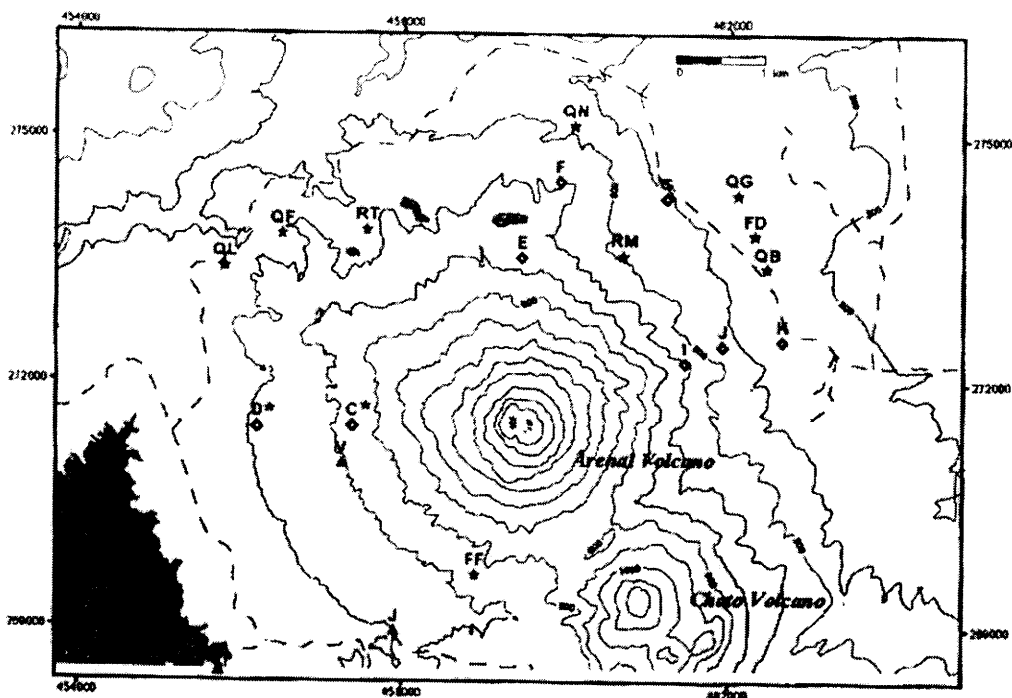
El procesamiento de los datos se hace utilizando los programas de computo suministrados por Lennartz (M88\_select), REFTEK (RNC\_client) y SEISAN (Haskov & Ottemöller, Universidad de Bergen, Noruega). El almacenamiento de los mismos se hace usando discos ópticos (2,6 Gb) y DVD (4.5 Gb).

Durante el periodo de 1974-1978, una red sismológica analógica se mantuvo operando alrededor del volcán Arenal. En el presente, solo una estación analógica localizada a 3,7 km al este de cráter (llamada FOR) permanece operando. Esta estación tiene un sensor de periodo corto (L4C-1s) y transmite por teléfono al OSIVAM y también a un centro de registro en el ICE en San José. La estación digital tiene el mismo nombre porque se mantiene en el mismo sitio que la estación analógica.

## **Otras técnicas de monitoreo**

### **Volcán Arenal (figura 2)**

- ◆ Red de 9 inclinómetros secos (C, D, F, I, J, K, L, M and N) localizados a lo largo de líneas radiales alrededor del volcán. Las estaciones A y E fueron destruidas por actividad volcánica, la estación B (1991) fue destruida por la fuerte erosión la estación G por efectos humanos.
- ◆ Monitoreo geoquímico y termal de 7 fuentes calientes: FD, B1 y B2, MF, QG, QL y RT (ver trabajo de López et al., 2006) y 2 frías (QF y QB) que se realiza cada mes, y cada dos meses, se hace un muestreo de gases en 2 sitios (QN y FF).
- ◆ Observaciones de campo (monitoreo visual) se realizan periódicamente con el fin de observar la dinámica del volcán y detectar cualquier fenómeno anormal. También hay un control periódico de las nuevas coladas de lava y flujos piroclásticos, recolección mensual de muestras de cenizas para análisis granulométrico, cálculo de masa y determinación de la composición.



**Figure 2.** Monitoreo del Volcán Arenal. Las estrellas indican los sitios del muestreo geoquímico y termal, los triángulos los sitios del muestreo de ceniza y los rombos los inclinómetros secos. Los sitios C\* y D\* incluyen inclinómetros secos y recolectores de ceniza. Arenal volcano monitoring (The stars represent the sites for geochemical sampling, the triangles represent the location of the ash collectors and the rhombuses are the dry stations. C\* and D\* points include dry tilt station and ash collector).

### Volcán Miravalles (figura 3)

- ◆ Red de 11 inclinómetros secos (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J y K).
- ◆ Red de nivelación precisa y levantamiento micro gravimétrico.
- ◆ Monitoreo geoquímico y termal en un sitio.

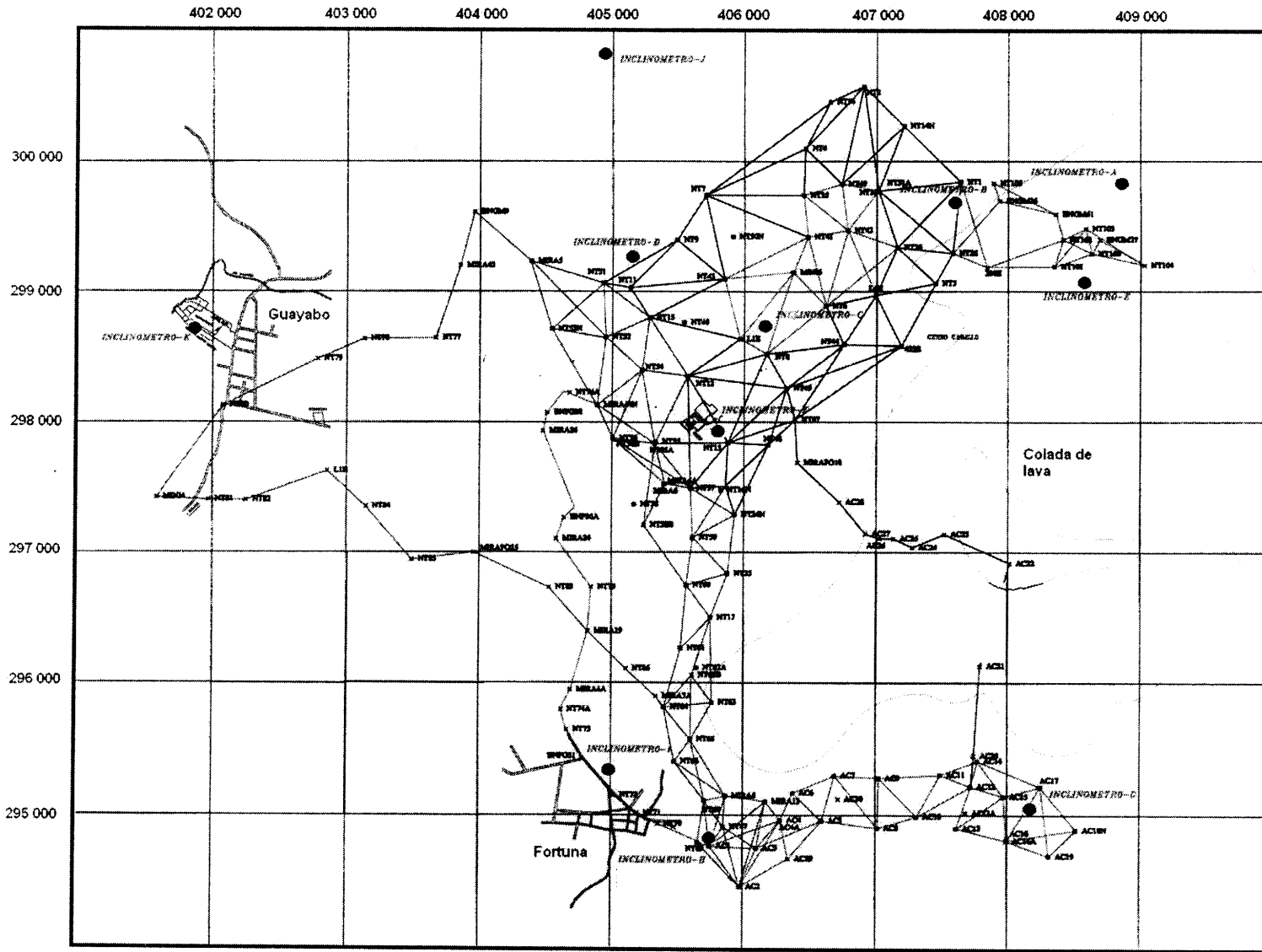
### Volcán Rincón de la Vieja

- ◆ Red de nivelación precisa y campañas geofísicas.
- ◆ Observación de campo.

Junto con el monitoreo sísmico y volcánico aquí descrito, desde 1985 el personal del OSIVAM está también dedicado a estudios geológicos generales, tefraestratigrafía, neotectónica, sismotectónica, fotogeología, sismicidad inducida, amenaza sísmica y volcánica y otras actividades promocionales.

### Publicaciones

- Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal (en 1988) y desde finales de 1996 el nombre cambió a Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles.
- Resúmenes anuales de la actividad sísmica de Miravalles y la actividad volcánica de los volcanes Tenorio, Rincón de la Vieja y Arenal.
- Reportes especiales en caso de crisis sísmicas y volcánicas.



**Figure 3.** Red geodésica e inclinómetros secos para el monitoreo del campo geotérmico Miravalles. Los inclinómetros secos A, B, C y D se mantienen en operación desde 1986, los inclinómetros secos E, F, G, H, I, J y K operan desde el año 2000. Las cruces y los cuadrados representan los puntos para las mediciones verticales y horizontales. Geodetic and dry tilt network for monitoring of the Miravalles Geothermal Field. Dry-tilt stations A, B, C and D are working since 1986, dry tilts E, F, G, H, I, J and K since 2000. The crosses and quadrangles represent the benchmarks for horizontal and vertical survey.

## **Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM)**

---

**P.O. BOX. 10032-1000 San José, Costa Rica**

**Telephone: (506) 6955193**

**Fax: 6955193**

**e-mail OSIVAM:** wtaylor@ice.go.cr

**Editors:** galvaradoi@ice.go.cr and lmadrigal@ice.go.cr

The Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), belongs to the Área de Amenaza y Auscultación Sísmica y Volcánica of Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, Costa Rica), and it is member of the World Organization of Volcano Observatories (WOVO).

Formerly, in 1988 it was named Observatorio Vulcanológico del Arenal (OVA), for then devoted mainly to the Arenal volcano observation, besides other monitoring tasks. However, due to the installation of a geothermal plant located at the foot of Miravalles volcano, which started production in 1994, ICE advocated to the geothermal field as well. Since then, and also because of the link between these two new seismological sub-networks around Arenal and Miravalles volcanoes, OVA became OSIVAM in 1996. Today, detailed research is also being carried out by OSIVAM at Rincón de la Vieja volcano, site for a new geothermal exploitation.

### **Professional staff of OSIVAM and related tasks:**

Guillermo E. Alvarado	Volcanology and Neotectonics
Waldo Taylor	Seismology and Neotectonics
Álvaro Climent	Seismic Engineering
José Barrantes	Electronic Engineering
José Cerdas	Geodesy, Topography
José Fernández	Chemistry
Jochen Bundschuh	Geochemistry and Hydrogeology

### **Technical and Auxiliary staff**

Francisco Arias	Luis A. Madrigal
Raúl Barquero	Marco Naranjo
Dagoberto Boniche	María Torres
Guido Calvo	
Luis Anchía	

### **Arenal, Miravalles and Rincón de la Vieja volcanoes**

Arenal volcano is located in the northern part of Costa Rica, halfway between Guanacaste and Central volcanic ranges. The height of the volcano is about 1720 m above the sea level and around 1100 m over the surrounding area. Being at least a 7000 year old volcano, its current volcanic activity has been continuous since July of 1968 and is



characterized by strombolian explosions, lava and pyroclastic flows, fumarolic activity and a permanent lava pool since 1974; also small volcano-tectonic swarms take place occasionally. Recording of seismic and visual data has been continuously accomplished since 1974.

Miravalles volcano is located in the Guanacaste Volcanic Range. The complex volcano edifice lies over a series of old stratovolcanoes built through the past half million years. The volcano rises 2028 m above the sea level at the site of Guayabo Caldera, where the main ignimbrite events have taken place 0.6 millions years ago. In despite of the lack of historical activity records during the last three centuries, this volcano may have presented Holocene activity. A geothermal power plant is operating at the southwestern foot of the volcano since 1994 (150 MW).

Rincón de la Vieja volcano is also located in the Guanacaste Volcanic Range, with a summit height of 1895 m above the sea level. It is an enormous active complex stratovolcano whose activity consists of sporadic phreatic and phreatomagmatic eruptions, with laharcic episodes and fumaroles. At present, ICE is investigating the geothermal potential of this volcano and a drilling project is going on since 2002.

### **Seismological instrumentation**

ICE implemented a seismological network of 5 telemetric digital seismic stations (MARS-88 Lennartz trigger system), and continuous recording of 17 portable seismic stations (16 REFTEK 130-02 and 1 COSSACK RANGER) and 7 strong motion devices (6 ETNA Kinematics and one Mars-88 Lennartz) at the northern part of Costa Rica. The network, whose configurations are sketched in figure 1, records the seismicity around Arenal, Miravalles and Rincón de la Vieja volcanoes (see details in Table 1).

There are 5 seismic stations around Arenal volcano (FOR, REY, CAS, MAC AND ARE-1) and 1 more distant station (CHI) complement the monitoring of the volcano and the tectonic graven occupied by the Arenal Lake. Additionally, 3 strong motion instruments (AC2, AC3 and AC4) are located at Sangregado dam (6.5 km W of Arenal volcano). Five seismic stations (LIM, COL, MES, CUI and CMU) and one strong motion device are located into and around Miravalles Geothermal Field (AC1). The signals of 6 stations (5 from Miravalles and 1 from Arenal volcano) are telemetered to the main recording center, OSIVAM, at Chiripa Mount (near Tilarán town). During the second semester of 2004, started the seismic monitoring of Pailas and Borinquen geothermal fields at Rincón de la Vieja volcano flanks with 9 seismic stations (GBS1, GB1A, BUEV, GBS2, GBS3, GPS1, GPS2, GPS3, GPS4) and an additional one between Bagaces and Liberia (NYA9). Finally three strong motions instruments are located in Sandillal dam (PS 1, PS2 and PS3). The sensors of seismic stations are three channels LE-3D, short period (1 Hz) and 0.7 damping factor.

Data processing is achieved by using software provided by Lennartz. (M88\_select), REFTEK (RNC\_client) and the SEISAN program (Haskov & Ottemöller, University of Bergen, Norway). The database is stored in optical disks (2.6 GB) and DVD disks (4.5 GB).

**Table 1.** Location of the seismological stations of OSIVAM network.

Station	Code	Latitude (North)	Longitude (West)	Elevation (m a.s.l.)
Fortuna (analogical)	FOR	10° 28.10	84° 40.31	384
Fortuna (digital)	FOR	10° 28.10	84° 40.31	384
Castillo	CAS	10° 26.10	84° 44.17	559
Flanco oeste Arenal	ARE1	10° 27.66	84° 43.13	700
Macadamia	MAC	10° 30.01	84° 46.16	832
Chiripa	CHI	10° 26.68	84° 54.59	1029
Monterrey	REY	10° 31.72	84° 42.04	606
Sangregado Cresta	AC2	10° 25.58	84° 45.75	552
Sangregado Berma	AC3	10° 28.58	84° 45.75	520
Sangregado Base	AC4	10° 28.62	84° 45.61	490
Cuipilapa	CUI	10° 39.54	85° 09.96	528
Limonal	LIM	10° 41.97	85° 15.24	591
Colonia	COL	10° 40.01	85° 12.35	445
Cabro Muco	CMU	10° 42.92	85° 09.30	979
Mesas	MES	10° 44.53	85° 11.78	631
Casa de Máquinas Miravalles	AC1	10° 42.12	85° 11.66	615
Sandillal Cresta	PS-1	10° 28.12	85° 04.12	150
Sandillal Berma	PS-2	10° 28.12	85° 04.12	130
Sandillal Base	PS-3	10° 28.12	85° 04.12	110
Guarda Parques	GPS1	10° 46.37	85° 20.95	800
Rincón de la Vieja Lodge	GPS2	10° 45.26	85° 21.08	640
Bodega ICE	GPS3	10° 45.22	85° 21.91	580
Torre Cañas Dulces	GPS4	10° 45.10	85° 26.11	580
Hotel Borinquen	GBS1	10° 48.67	85° 24.59	640
Borinquen arriba	GB1A	10° 49.21	85° 23.91	740
Hotel Buena Vista	BUEV	10° 47.89	85° 24.42	720
Las Lilas	GBS2	10° 50.15	85° 27.15	400
Hacienda Las Imágenes	GBS3	10° 46.91	85° 27.33	300
Pijije	NYA9	10° 32.00	85° 22.00	100

Form 1974 to 1978, a network of analogical seismographic stations was operating around Arenal volcano. In the present, only one station (called Fortuna: FOR) is still under operation, located 3.7 km eastwards of the summit crater. This station has a short-period vertical seismometer (L4C-1 s) and is transmitted by phone line to the OSIVAM and also to a recording center at ICE in San José. The digital station has the same code name because is located in the same place.

### Other monitoring techniques

#### Arenal volcano (figure 2)

◆ A network of 9 dry tilt stations (C, D, F, I, J, K, L, M and N) located along radial lines around the volcano. Stations A and E were destroyed by volcanic activity, station B (1991) by strong erosion and G by anthropic effects.

◆ Geochemical and thermal monitoring of 7 hot springs (FD, B1and B2, MF, QG, QL and RT) and cool springs (QB and QF); every month and occasionally 2 degassing sites (QN and FF).

◆ Field geological observation (observational monitoring) is carried out periodically in order to inspect the volcano dynamics and to detect any abnormal phenomena. There is also a periodical mapping of new lava and pyroclastic flows and monthly collection of ash samples for grain size analysis, mass calculation and composition determination.

#### **Miravalles volcano (figure 3)**

- ◆ Network of 11 dry-tilt stations (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J and K).
- ◆ A series of BM for precise leveling survey and micro-gravity
- ◆ Geochemical and thermal monitoring at one site

#### **Rincón de la Vieja**

- ◆ Seismology stations
- ◆ An arrangement of BM for precise leveling and geophysical surveillance.
- ◆ Field geological observation

Together with the routine volcanic and seismic monitoring here described, since 1985 OSIVAM staff is also devoted to general geologic studies, tephra-stratigraphy, neotectonics, seismotectonics, photogeology, induced seismicity, seismic and volcanic hazard assessment and promotion activities.

#### **Publications**

- Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal (in 1988) and since late 1996 it was renamed as Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles.
- Annual summaries of the seismic and volcanic activities in Miravalles, Tenorio, Rincón de la Vieja and Arenal volcanoes.
- Special reports in case of seismic and volcanic crisis.

## **Tendencias Estacionales en la Hidrogeoquímica de los Manantiales Termales del Volcán Arenal (2004-2005)**

**[Seasonal tendencies in the hydrogeochemical behavior of thermal springs of the Arenal volcano (2004-2005)]**

**Oscar H. Lücke**  
oslucke@yahoo.com

**María I. Sandoval**  
maisandov@yahoo.com

### **Estudiantes de la Escuela Centroamericana de Geología, UCR**

Lücke, O. & Sandoval, M.I., 2006: Tendencias estacionales de la hidrogeoquímica de los manantiales termales del volcán Arenal (2004 - 2005). -Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29): 1-10. San José.

### **Resumen**

Se analizan hidrogeoquímicamente algunos manantiales calientes de los alrededores del volcán Arenal para el período 2004-2005, donde se estudian muestras recolectadas en marzo y octubre con el objetivo de identificar variaciones estacionales. Para esto se realizan gráficos de Piper, Schoeller y pH. Se identificaron, además, que las temperaturas anuales variaron entre 49°C y 24°C, y la mayoría de manantiales se clasifican como calientes (37-42°C). Según el análisis hidrogeoquímico para el año 2004 y 2005, las poblaciones dominantes se clasifican como cloruradas cálcicas y cloruradas magnésicas. Los gráficos de Schoeller para el 2004 muestran una población dominante de cationes y aniones entre 2 y 10 meq/kg, mientras que específicamente para el mes de octubre del año 2005 se encuentra una población definida que posee valores entre 3 y 10 meq/kg, y para marzo las concentraciones se encuentran entre 0,5 y 10 meq/kg. Los gráficos de pH muestran valores entre 6,3 y 6,7 lo que caracteriza a las aguas como ácidas. En general, no hay variaciones estacionales significativas en los gráficos realizados entre los meses de marzo y octubre.

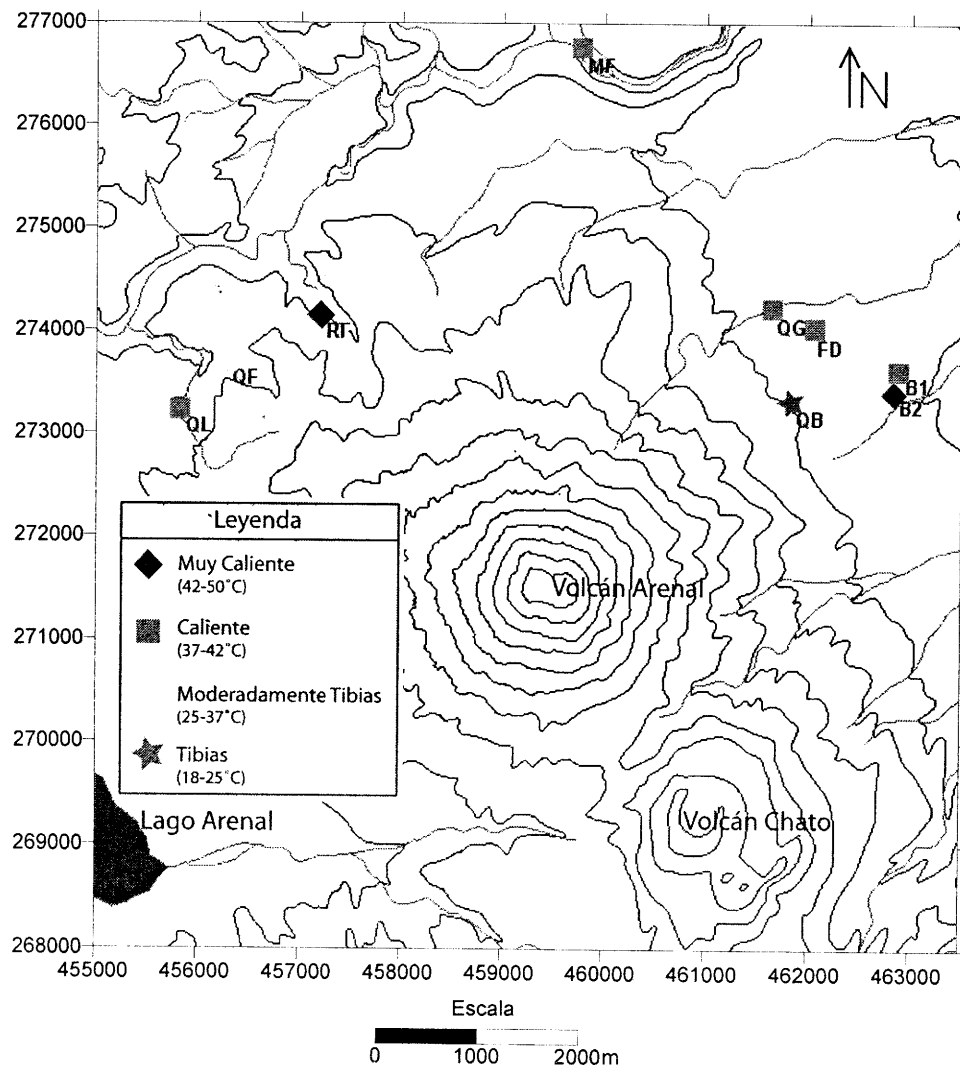
### **Abstract**

Hydrogeochemical analysis were carried out on the hot springs around the Arenal volcano for the years 2004 through 2005, in which samples from the months of March and October of each year were studied in order to identify or rule out seasonal variations using Piper, Schoeller and pH graphs. Temperatures between 24°C and 49°C were recorded, which means that most of the springs fall into the "hot" category (37-42°C). According to the hydrogeochemical analysis, the dominant sample groups are classified as chlorinated-calcic and chlorinated-magnesian. The Schoeller plots for the samples from 2004 show a mean concentration between 2 and 10 meq/kg, while for October of 2005 values range between 3 and 10 meq/kg, and for March of 2005, concentrations are between 0.5 and 10 meq/kg. The pH graphs show values between 6.3 and 6.7 showing a slightly acidic composition of the waters. No significant seasonal variations were identified.

**Introducción**

La composición química de las aguas de los manantiales termales en la zona del volcán Arenal fue estudiada en el presente trabajo para el periodo 2004-2005, con el fin de caracterizar las muestras a partir de su composición iónica y parámetros adicionales como la temperatura y pH. Además, se compara el comportamiento hidrogeoquímico en las estaciones seca y lluviosa con el fin de identificar la influencia que tienen las variaciones del régimen pluvial en la composición de las aguas que conforman el sistema hidrotermal en la periferia del edificio volcánico principal. La relación de los manantiales con el sistema hidrotermal se manifiesta en las temperaturas relativamente altas que presentan las aguas (Fig. 1).

El análisis se llevó a cabo para las aguas de los manantiales QL, QF, RT, MF, QG, FD, QB y las perforaciones B1 y B2, ubicados en los flancos noreste y noroeste del volcán Arenal cuya distribución se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Ubicación de los puntos de muestreo y caracterización de las aguas según las temperaturas.

### Metodología

A partir de la base de datos de análisis químicos para los manantiales termales código B1, B2, FD, QB, QF, QG, QL y MF, han sido seleccionados los meses de marzo y octubre de los años 2004 y 2005. Esto se debe a que marzo y octubre fueron considerados los meses más representativos para la época seca y época lluviosa, respectivamente.

Posteriormente, se analizaron los datos hidrogeoquímicos mediante los métodos de Piper y Schoeller. Los análisis con el gráfico de Piper fueron realizados con el fin de caracterizar las aguas a partir de su composición iónica e identificar similitudes y diferencias entre las poblaciones de muestras. Las poblaciones fueron establecidas de acuerdo con la distribución determinada en la figura 2. A partir de los gráficos de Schoeller, se analiza la abundancia relativa de especies iónicas y se comparó entre las distintas muestras para establecer poblaciones, así como para identificar ya sea variaciones o comportamientos constantes en la composición durante las distintas épocas y en distintos años. El análisis de pH fue realizado con frecuencias mensuales para cada año con el fin de identificar tendencias individuales para cada muestra y su relación con las demás.

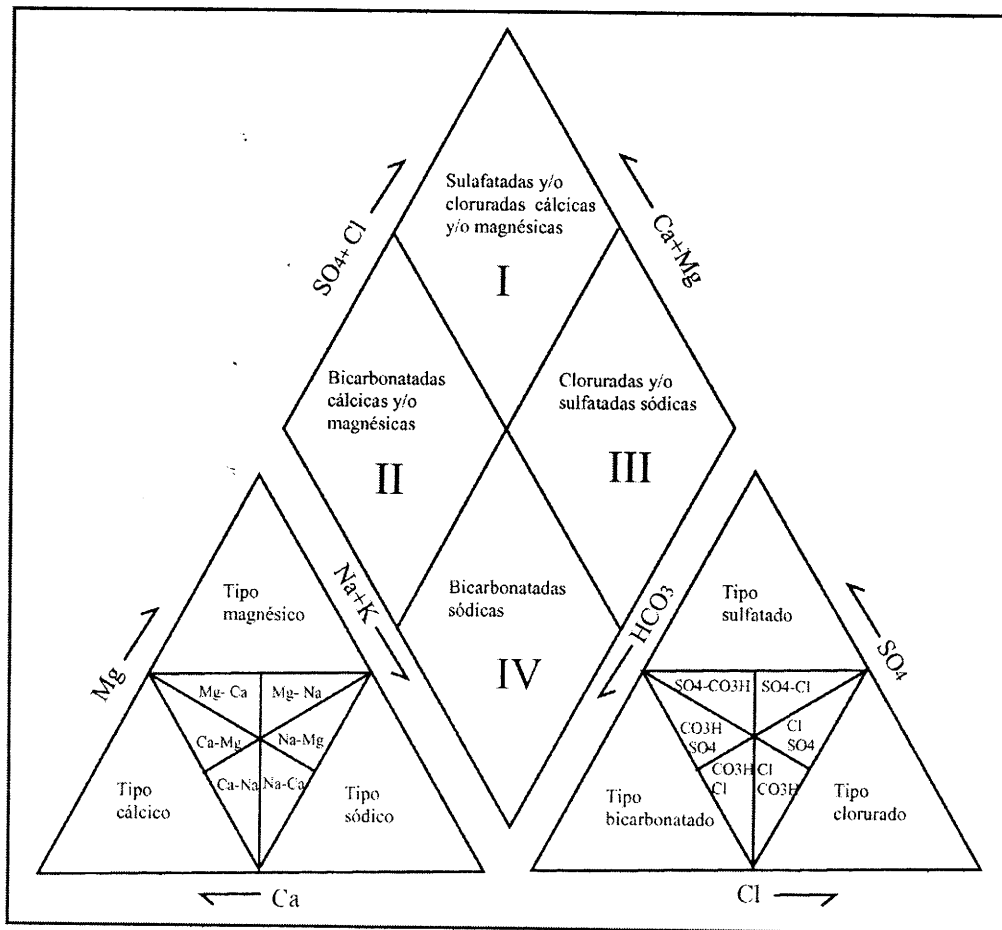


Figura 2. Campos de clasificación de las aguas asignados para el diagrama de Piper. Modificado a partir de Custodio & Llamas (2001).



### Datos y análisis de resultados

Para cada muestra se realiza una caracterización física y química de las aguas para los años 2004-2005, durante estación seca y lluviosa. Para esto se utilizó la clasificación por temperaturas de Bogomolov y para la clasificación química se realizaron diagramas de Piper y Schoeller para nombrar las aguas y observar las concentraciones de los componentes por poblaciones. También se realizaron gráficos de pH anuales.

**Tabla 1.** Clasificación por temperaturas para el año 2004.

Muestra	Temperatura promedio	Clasificación (según Bogomolov, 1966)
B2	49,7	Muy calientes
RT	48,3	
QG	41,5	Calientes
FD	39,9	
B1	37,5	
QL	32,4	Moderadamente tibias
QF	29,7	
QB	25,2	Tibias

**Tabla 2.** Clasificación por temperaturas para el año 2005.

Muestra	Temperatura promedio	Clasificación (según Bogomolov, 1966)
B2	49,2	Muy Calientes
RT	48,7	
QG	42,0	Calientes
FD	41,0	
MF	39,1	
B1	37,4	
QL	37,3	
QF	30,2	Moderadamente tibias
QB	24,1	Tibias

A partir de la comparación de las tablas 1 y 2, las temperaturas son estables con excepción de la muestra QL que varió de moderadamente tibias a caliente, pero no representa un cambio relevante en la temperatura ya que apenas varía aproximadamente en 5°C. Por lo tanto, el comportamiento de los manantiales termales de la zona son estables, lo cual no es congruente con las características descritas por Custodio & Llamas (2001) quienes establecen que las aguas termales varían considerablemente y que representan un caso especial de las aguas subterráneas, en donde la temperatura es variable.

De ello se puede interpretar que este comportamiento estable no ha variado en los últimos dos años, porque las variaciones dadas en el gradiente geotérmico no han sido tan influyentes o, simplemente no ha variado.

### Diagramas de Piper

Las muestras para el análisis composicional según Piper, corresponden con dos meses por año (2004-2005), en donde los datos utilizados representan estación seca y la otra la estación lluviosa, con el objetivo de analizar variaciones o similitudes anuales y estacionales. A partir de los diagramas (Fig. 3) se obtiene la siguiente distribución composicional resumida en las tabla 3.

**Tabla 3a.** Marzo 2004.

Muestra	Fecha	Composición Piper
B1	30/3/04	Clorurada cálcica
B2	30/3/04	
FD	30/3/04	
QB	30/3/04	Bicarbonatada cálcica
QF	30/3/04	Bicarbonatada magnésica
QG	30/3/04	Clorurada magnésica
QL	30/3/04	
RT	30/3/04	

**Tabla 3b.** Octubre 2004.

Muestra	Fecha	Composición Piper
B1	26/10/04	Clorurada cálcica
B2	26/10/04	
FD	26/10/04	
QB	26/10/04	Bicarbonatada cálcica
QF	26/10/04	Bicarbonatada magnésica
QG	26/10/04	Clorurada magnésica
QL	26/10/04	
RT	26/10/04	

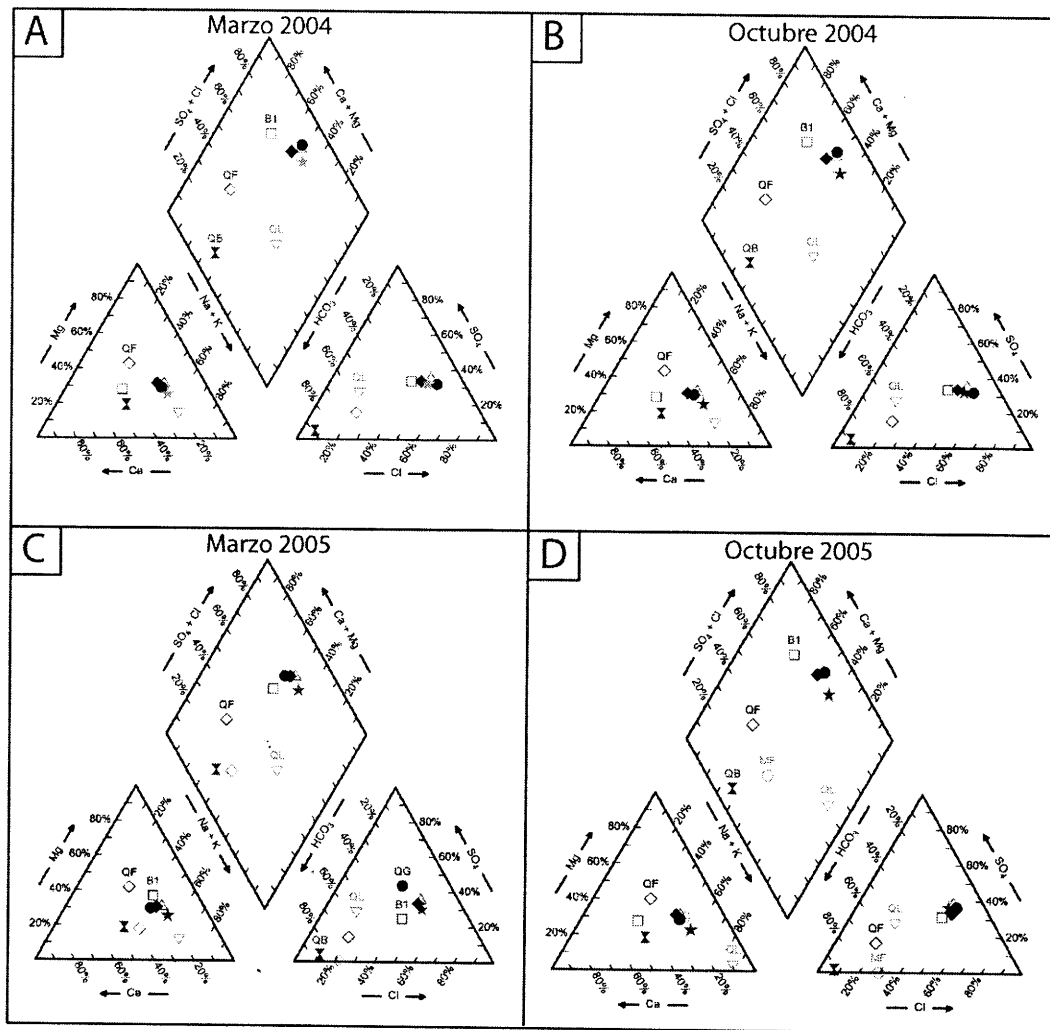
**Tabla 3c.** Marzo 2005.

Muestra	Fecha	Composición Piper
B1	31/3/05	Clorurada magnésica
B2	31/3/05	
FD	31/3/05	
MF	31/3/05	Bicarbonatada cálcica
QB	31/3/05	
QF	31/3/05	Bicarbonatada magnésica
QL	31/3/05	Sulfatada magnésica
QG	31/3/05	
RT	31/3/05	Clorurada sódica

**Tabla 3d.** Octubre 2005.

Muestra	Fecha	Composición Piper
B1	11/10/05	Clorurada cálcica
B2	11/10/05	Clorurada magnésica
FD	11/10/05	
QG	11/10/05	
MF	11/10/05	Bicarbonatada magnésica
QF	11/10/05	Bicarbonatada cálcica
QB	11/10/05	
QL	11/10/05	Sulfatada sódica
RT	11/10/05	Clorurada sódica

Para el mes de marzo del año 2004, la mayor población se encuentra en el tipo clorurada cálcica o clorurada magnésica, y sólo las muestras QF y QB son composicionalmente diferentes al resto. Durante el año 2004 no hubo variaciones estacionales en la composición del agua, siendo las muestras tomadas en marzo y en octubre similares y ninguna muestra varió en este lapso de tiempo. En cuanto al mes de marzo de 2005, la mayoría de las muestras son cloruradas magnésicas, luego predomina el tipo bicarbonatada cálcica o magnésica y las muestras RT y QG son completamente distintas de las otras muestras. Al igual que para el año 2004, las muestras del 2005 no se presentan grandes variaciones entre marzo y octubre, solamente en la muestra QL que varía en estación lluviosa a sulfatada sódica. En general las muestras varían de cálcicas a magnésicas.



- Legenda**
- B1
  - △ B2
  - ◆ FD
  - MF
  - ⊗ QB
  - ◇ QF
  - QG
  - ▽ QL
  - ★ RT

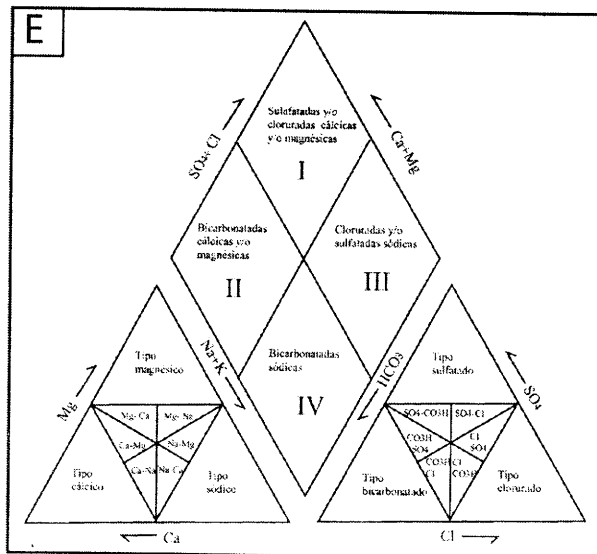


Figura 3. Diagramas de Piper.

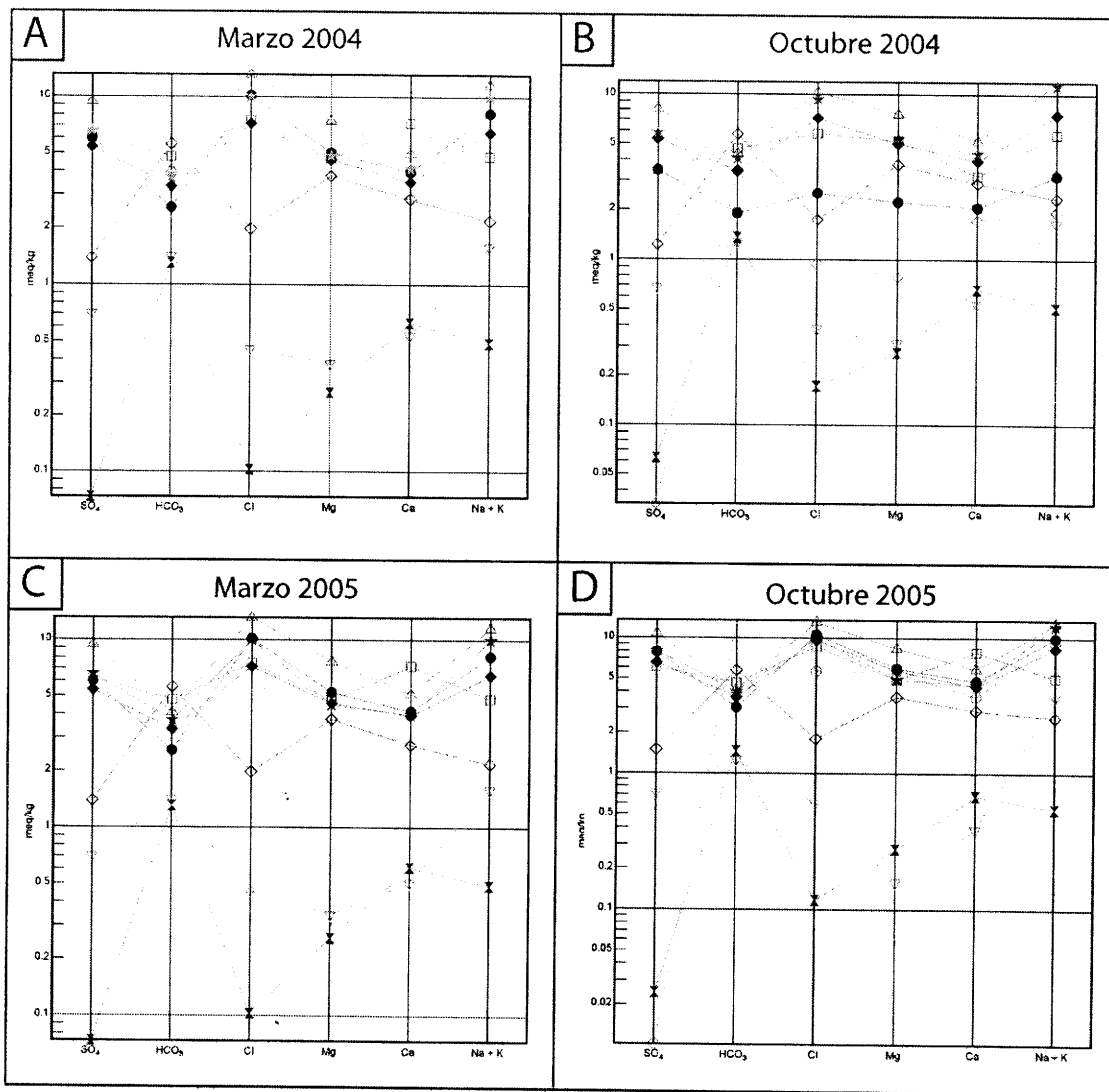
### Diagramas de Schoeller

En el año 2004, fue posible identificar una población de muestras representadas por B1, B2, QG, FD y RT que se ubican entre los valores de 2 y 10 meq/kg de todos los componentes del diagrama. Además, fue posible establecer una tendencia de las muestras QL, QF y QB a presentar concentraciones bajas, siendo la muestra QB la que posee las concentraciones más bajas de  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Na}+\text{K}$  (Fig. 4).

Al igual que los gráficos de Piper, no se observan variaciones estacionales para este año. Los valores de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}+\text{K}$  representan las concentraciones más elevadas en las muestras B1, B2, QG, FD y RT.

Es posible que haya una relación entre la ubicación de las muestras y sus concentraciones, ya que las muestras B1, B2, QG, FD representan una población muy definida en el diagrama y su ubicación es cercana y todas se encuentran al sector noreste del volcán.

Para el año 2005, se identifica una población definida en el gráfico de octubre, representada por las muestras B1, B2, FD, QG, MF, que poseen valores de 3-10 meq/kg, con respecto a estas mismas muestras en marzo las concentraciones son más variadas y se encuentran valores desde 0.5-10 meq/kg (Fig. 4). Además, es posible establecer una tendencia de las muestras MF, QB a presentar concentraciones bajas, siendo la muestra MF la que posee las concentraciones más bajas de  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Na}+\text{K}$ .



**Leyenda**

□	B1
△	B2
◆	FD
⊗	QB
◇	QF
●	QG
▽	QL
★	RT

Figura 4. Diagramas de Schoeller.

### Variaciones de pH

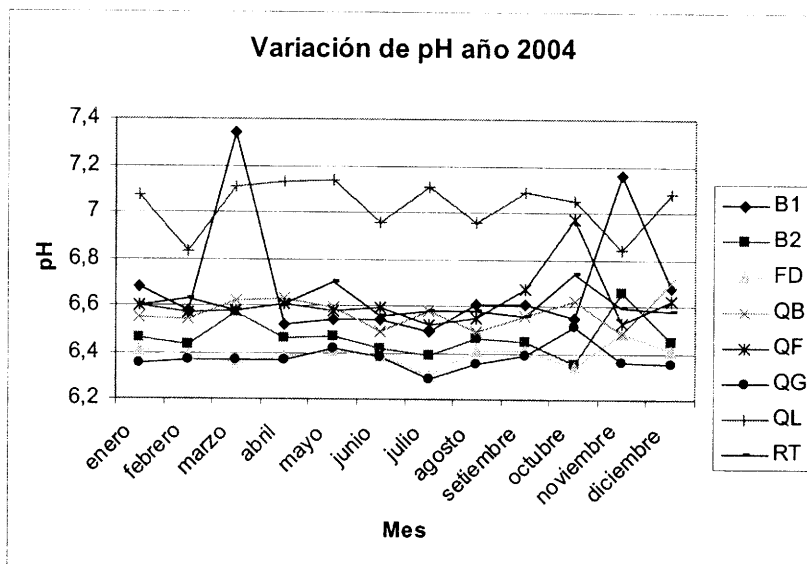


Figura 5. Variaciones de pH de para el año 2004.

La mayoría de las muestras (RT, QB, B2, FD, QG) poseen un pH entre 6,3-6,7 lo que las caracteriza como aguas ácidas. En la muestra B1 sí se pueden distinguir variaciones estacionales como un aumento en el pH medido en marzo y en noviembre. También en la muestra QF se puede observar un ascenso en la curva en el mes de octubre (Fig. 5), y al igual que la anterior, en estos meses mencionados pasan a condiciones básicas. La muestra QL durante todo el año permanece con un pH neutro y la curva difiere notablemente del resto, ya que las variaciones son muy regulares y se definen claramente.

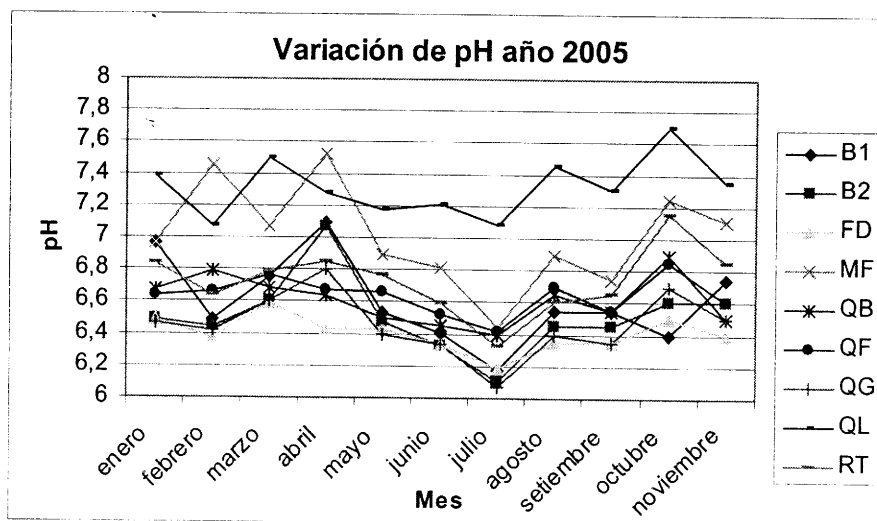


Figura 6. Variaciones de pH de para el año 2005.



Al igual que para el 2004, la mayoría de las muestras se encuentran entre pH de 6 y 7 y presentan variaciones mensuales bien definidas en abril en el cual sube y en julio baja el pH. La muestra QL presenta valores constantes en el rango entre 7,2 y 7,7; además la muestra MF posee un cambio brusco a partir del mes de mayo (Fig. 6), donde empieza a disminuir el pH hasta alcanzar en julio el valor mas bajo con respecto al resto de las otras muestras y continua el patrón general a partir de este mes.

### **Conclusiones**

Durante el 2004 y 2005 las temperaturas no variaron considerablemente, sólo la muestra QL varió de moderadamente tibia a caliente.

Los manantiales analizados para el año 2004 y 2005 muestran poblaciones definidas en los gráficos de Piper, en donde las poblaciones del campo I, II, tanto para el mes de marzo como para el de octubre de ambos años son similares, por lo que se concluye que la composición no ha variado y no se observa una evolución drástica en las muestras en los últimos dos años.

En general, las poblaciones que se obtienen en los gráficos de Piper son congruentes con las muestras que se agrupan en los gráficos de Schoeller, con la diferencia que este último caracteriza las muestras con respecto a la concentración y es útil para determinar el enriquecimiento de las muestras en alguno de sus componentes.

La comparación entre los gráficos de pH y las poblaciones mencionadas no muestran ninguna tendencia particular, por lo que se concluye que el pH y la composición química de las aguas termales del volcán Arenal no se relacionan.

En cuanto al comportamiento de las aguas en la época seca y lluviosa, se concluye que no se observan variaciones significativas en la composición de las aguas subterráneas relacionadas con el comportamiento de las aguas pluviales. Por lo tanto, la abundancia relativa de los iones analizados en las aguas de los manantiales termales del Volcán Arenal, no tiende a cambiar con las épocas.

### **Referencias**

Bogomolov, G.V., 1966. Hydrogeologie et notions de géologie d ingénieur. -86 págs. Ed.de la Paix, Moscú.

Custodio, E. & Llamas, M.R., 2001. Hidrología subterránea. -1154 págs. Ediciones Omega, S.A, Barcelona.

Piper, A., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. -Trans. Amer. Geophy. Union, 25: 914-923; Washington DC.

## **Análisis de las cenizas eruptadas por el volcán Arenal durante abril de 1992 a agosto del 2001 y enero del 2004 a mayo del 2006 con respecto al tipo de actividad.**

[Analysis of the ashes erupted by the Arenal volcano during April, 1992 to August, 2001 and January, 2004 to May, 2006 with regard to the activity type.]

**Carlos Vargas** alonsov\_cr@yahoo.es, **Alexis Vindas** piki@costarricense.cr **Claudio González** cgonzalezsolis@gmail.com

### **Estudiantes de la Escuela Centroamericana de Geología, UCR**

Vargas, C., Vindas, A. & González C., 2006. Análisis de las cenizas eruptadas por el volcán Arenal durante abril de 1992 a agosto del 2001 y enero del 2004 a mayo del 2006 con respecto al tipo de actividad. -Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29): 11-25. San José.

### **Resumen**

Se analizaron los datos de las casetillas de recolección de ceniza C, D y V en el sector oeste del volcán Arenal y se dividieron en dos grupos: el primero en un registro de porcentajes de caída de ceniza fina y gruesa desde el 23/04/1992 hasta el 09/09/2001 para la estación C; el segundo grupo inicia el 06/01/2004 y finaliza el 02/03/2006, analizando cenizas para las estaciones C, V y D. Se calculó la cantidad de ceniza que cae en el cráter con la fórmula AR:  $(3C + 3V + 5D) / 3$  (Soto, 1998) y se da la relación de ceniza caída en las unidades gr./ $(m^2/día)$ . El primer grupo (casetilla C) tiene cuatro periodos: el periodo 1 caracterizado por altos niveles de ceniza, el periodo 1 también posee porcentajes elevados de ceniza fina, el periodo 3 posee niveles uniformes de ceniza y una actividad explosiva, el periodo 4 tiene una media porcentual de ceniza fina más elevada. El segundo grupo (casetillas C, D, V) tiene igualmente cuatro periodos: en el periodo 1 predominan las cenizas finas con actividad piroclástica baja que aumenta hasta una fase explosiva; en el periodo 2 hay mayoría de ceniza gruesa, con flujos piroclásticos y un decrecimiento en las erupciones, el periodo 3 se caracteriza presentar la mayor cantidad de cenizas finas y un incremento en las erupciones y, por último, durante el periodo 4 la cantidad de ceniza disminuye junto con la actividad predominando los flujos piroclásticos. La cantidad de ceniza caída en el cráter es similar a la de toda la red, y aumenta solamente en el periodo 3. Al comparar los distintos periodos eruptivos con el material recolectado se obtuvieron patrones comunes para algunos lapsos temporales, pero no se observa ninguna correspondencia general.

### **Abstract**

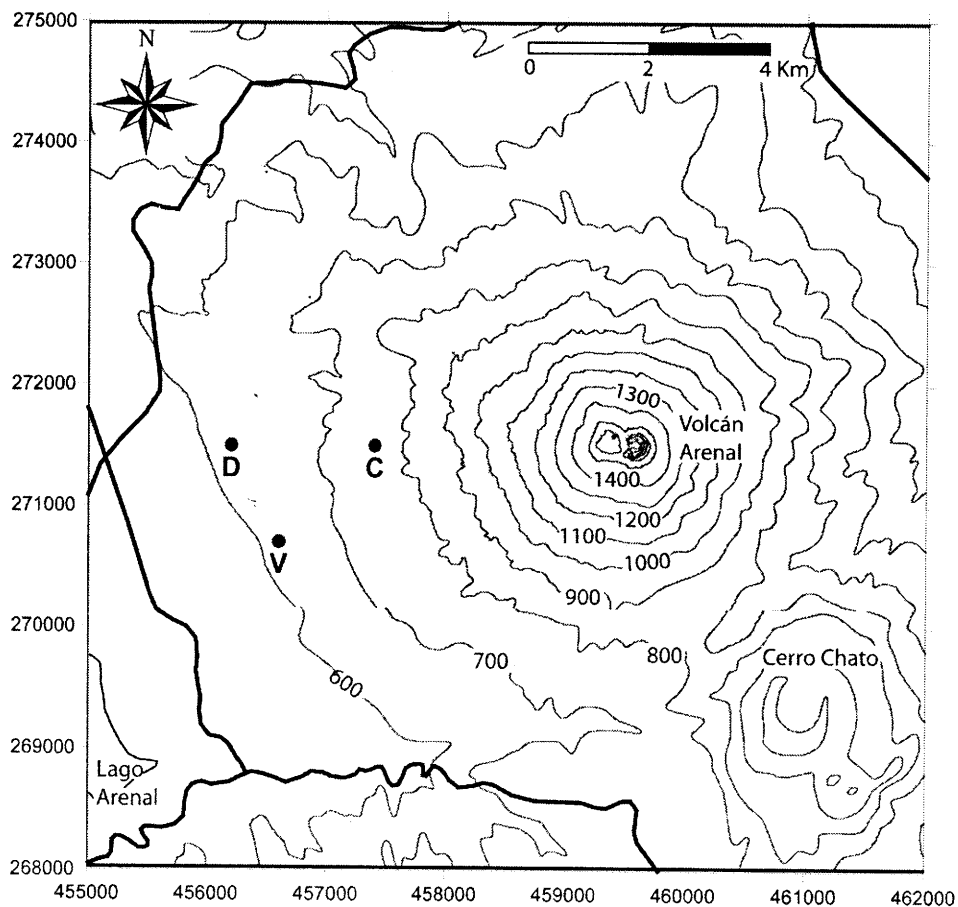
The data of the ash collectors C, D and V has been analyzed in the sector W of the Arenal volcano and they were divided in two groups: the first one shows a registration of percentages of fall of fine and thick ash from the 23/04/1992 up to the 09/09/2001 for the station C; the second group begins the 06/01/2004 and it concludes the 02/03/2006, analyzing ashes for the stations C, V and D. The quantity of ash that falls in the crater was calculated with the formula AR:  $(3C + 3V + 5D) / 3$  (Soto, 1998) and the relationship of fallen ash is given in gr./ $(m^2/day)$  units. The first group (collector C) has four periods: the period 1 characterized by high levels of ash, the period 2 who also possesses high percentages of fine ash, the period 3 possesses uniform levels of ash and an explosive activity, the period 4 has a percentage stocking of higher fine ash. The second group (collectors C, D, V) has four periods: in the period 1 the fine ashes prevail with low piroclastic activity that increases until an explosive phase; in the period 2 there is majority of thick ash, with piroclastic flows and less eruptions, the period 3 is characterized by fine ashes and an increment in the eruptions and the period 4 the quantity of ash diminishes like the activity prevailing the piroclastic flows. The quantity of ash fall in the crater is similar to that of the whole net, and it only increases in the period 3. When comparing the different eruptive periods with the recollected material, some common patterns were obtained for temporary lapses, but any general correspondence was observed.

## Introducción

El objetivo inicial del ICE al instalar la red de monitoreo en los alrededores del volcán Arenal, era estimar la cantidad de ceniza caída en el embalse. Los resultados de esa investigación se muestran en el trabajo de Soto (1998), el cual detalla que la red consistía de 7 recolectores distribuidos según la orientación de los vientos y la accesibilidad.

El presente trabajo utiliza los datos de ceniza para clasificar y caracterizar la actividad del volcán en periodos. Este análisis se divide en dos grupos basados en el espacio de tiempo que abarca.

El primer grupo de datos analizado, inicia en abril de 1992 y finaliza en agosto del 2001 y toma en cuenta solo la información para la casetilla C, dado que esta estación es la que presenta el registro más continuo. El segundo periodo inicia en enero del 2004 y finaliza en mayo del 2006, para el cual se contó con datos para las estaciones de recolección C, D y V (Fig. 1). La información del 2001 hasta el 2004 estaba incompleta por lo que no se utilizó.



**Figura 1.** Ubicación de la zona de estudio y las estaciones de muestreo de ceniza.

## Metodología

Los datos analizados corresponden a los sitios de recolección de ceniza C, D y V, (Fig. 1), los cuales se encuentran localizados según Soto (1998) en las siguientes coordenadas:

**Tabla 1.** Ubicación de los sitios de recolección.

Puntos	Lat.	Long.	m s.n.m.	Distancia al Cráter (km)
C	271500	457400	735	1,8
D	271500	456200	600	3,1
V	270700	456600	620	2,8

El análisis para estas estaciones se dividió en dos grupos de datos como se mencionó anteriormente. El primero consiste en un registro continuo de cenizas desde el 23/04/1992 hasta el 09/09/2003 para la estación C. Con esta información se realizó un análisis del comportamiento de la ceniza del volcán durante este periodo, mediante una figura de porcentajes de ceniza fina y gruesa durante el tiempo.

El segundo grupo de datos inicia el 06/01/2004 y finaliza el 30/05/2006 y consiste en los datos de ceniza para las tres estaciones (C, V y D). Además, se estimó la cantidad de ceniza que cae en el cráter mediante la fórmula establecida por Soto (1998):

$$AR: (3C + 3V + 5D) / 3$$

Donde para cada punto (C, V y D) es necesario establecer la relación de ceniza caída en las unidades gr./m<sup>2</sup>/día).

Los datos para los dos periodos fueron comparados con la actividad del volcán para buscar relaciones.

## Resultados

### **Análisis e interpretación de los registros de ceniza desde 1992 hasta el 2001 obtenidos en la casetilla C.**

A continuación se describe y se analizan los datos obtenidos en la recolección de ceniza registrados desde el 23 de abril de 1992 hasta el 7 de agosto de 2001. Este periodo se ha subdividido en cuatro sub-periodos considerando cambios notables en la tendencia de la media móvil del porcentaje de ceniza según su granulometría (fina: < 300  $\mu$ , gruesa:  $\geq$  300  $\mu$ ) en función del tiempo.

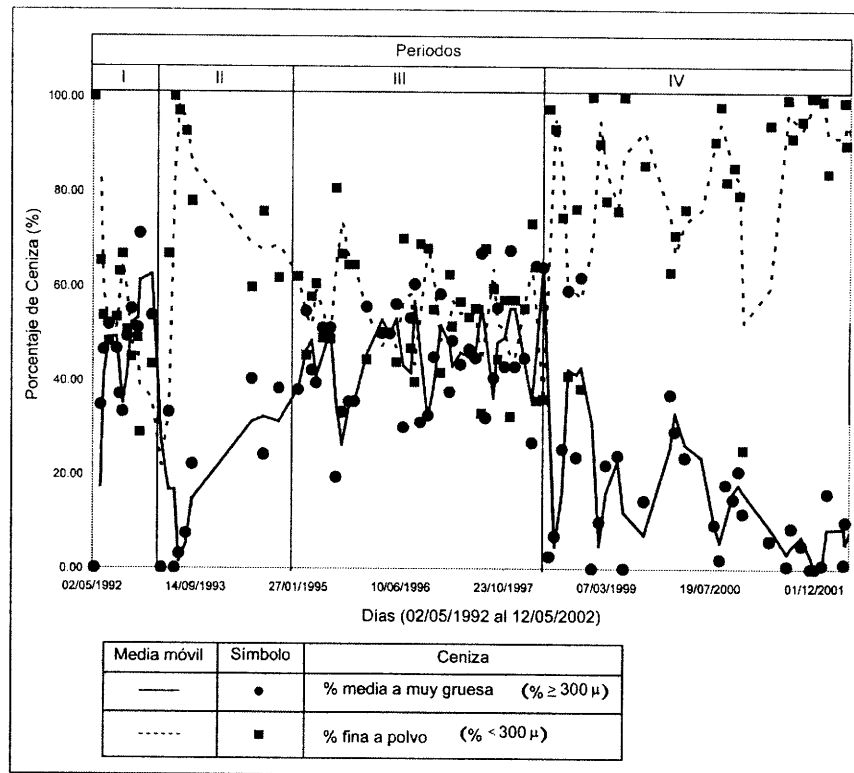


Figura 2. Altos niveles de ceniza gruesa junto con niveles mínimos.

### Periodo 1

Este periodo abarca del 2 de mayo de 1992 al 16 de marzo de 1993.

Se observa un incremento significativo del porcentaje de ceniza gruesa hacia los primeros 3 meses de este periodo. Este comportamiento decae durante el mes de septiembre de 1992, donde los registros de recolección para la casetilla C muestran un mínimo. Para los últimos tres meses de 1992, se observa un nuevo repunte en el porcentaje de ceniza gruesa, alcanzado su punto máximo hacia finales de diciembre de 1992 y principios de enero de 1993, en donde el registro en la casetilla C muestra el mayor peso de ceniza recolectado para este periodo. Al finalizar, se observa una leve disminución en el porcentaje de ceniza gruesa.

Coincidentemente con este periodo, Cole et al., (2005), menciona actividad explosiva (que se extiende de 1987 a 1994) de tipo "chugs", para describir una emisión rítmica de gas con o sin tefra. También se deriva "whooshes", al tipo de erupción que genera un sonido similar a la turbina de un jet y que va acompañado con una emisión sostenida de tefra y explosiones que se extienden por menos de dos segundos. Lo cual Melson (1995, en Cole et al., 2005) interpreta como una sucesiva apertura reflexiva del conducto, favoreciendo eventos de desgasificación.

## Periodo 2

Se extiende desde el 17 de marzo de 1993 al 23 de enero de 1995. Para todo este periodo el porcentaje de ceniza fina es muy elevado, notándose incremento desde un 45% para finales del periodo anterior hasta casi un 100% hacia los dos primeros meses de este periodo.

Hacia el tercer mes, la media móvil del porcentaje de ceniza fina, describe una tendencia descendente hasta alcanzar un porcentaje cercano al 60% al finalizar el periodo.

## Periodo 3

Comprende del 24 de enero de 1995 al 26 de marzo de 1998. Describe un comportamiento bastante similar al primer periodo. Se da un máximo en el porcentaje de ceniza fina recolectada en la casetilla C hacia finales de 1995, lo cual coincide con el reporte del GVN, 1996 (en Cole et al., 2005) el cual reporta observaciones visuales para diciembre de 1995 en donde las explosiones ocurrían con un intervalo entre explosión de 30 min. con un total de unas 60 explosiones por día. Continúa luego con un comportamiento más o menos uniforme durante el resto del periodo, dándose pequeñas fluctuaciones en el porcentaje de ceniza (fina y gruesa), representadas por valles y crestas dibujadas por las medias móviles. A continuación se presenta una síntesis de la actividad explosiva para este periodo.

Soto (1997), reporta actividad explosiva intensa para los meses de enero y febrero de este año. Además señala que la mayor actividad explosiva se dio el día 9 mayo de 1995 y que continuó constante hasta finalizar el año.

Para mayo y junio de 1996 se da un incremento en actividad explosiva con respecto a los primeros meses (mayor caída de ceniza según Soto & Arias, 1998) y en agosto y setiembre, flujos piroclásticos por colapso de columnas explosivas.

Para octubre de 1996 se reporta la erupción de gases y cenizas que se dirigen hacia el NE del edificio, cayendo de forma leve en La Fortuna (Soto & Arias, 1998).

Para 1997 se da una disminución en la cantidad de ceniza fina recolectada, coincidiendo con la actividad estromboliana predominante durante este año (GVN, 1997).

## Periodo 4

Se ubica entre el 27 de marzo de 1998 y el 27 de julio de 2001. Es el periodo que presenta la media porcentual de ceniza fina más elevada de los cuatro periodos. Esto a su vez contrasta con el reporte de Cole *et. al.*, (2005), para la actividad del volcán hacia el inicio de 1998, en donde los autores resumen diciendo que aunque ha habido una amplia variación en la frecuencia de las explosiones y un marcado decrecimiento en la actividad explosiva tuvo lugar para los primeros meses de 98.

Inicia este comportamiento, en nuestro caso, con un incremento abrupto en el porcentaje de ceniza fina recolectada en la casetilla C alrededor de mayo de 1998 y que continúa más o menos constante durante todo el periodo. Pequeñas fluctuaciones en los porcentajes relativos de cenizas (fina y gruesa) se dan durante todo el periodo,



ubicándose como punto mínimo en el porcentaje de ceniza fina (25%) hacia finales del 99. El periodo finaliza con un porcentaje de ceniza fina similar a aquel con el que se inició. La síntesis de la actividad para este periodo se presenta a continuación.

Durante el año 1998 se da un incremento en la actividad explosiva el cual sigue en aumento hasta alcanzar su máximo a finales del mismo año (Arroyo et al., 1999). Para noviembre 1999 (GVN, 1999) se da un incremento en la cantidad y energía de la actividad explosiva, produciendo el 26 de este mes un flujo piroclástico que descendió por el flanco occidental del volcán.

Para el año 2000 se reporta a mediados del mes de abril una gran cantidad de ceniza, en donde las columnas de ceniza alcanzaron los 500 m y provocaron lluvia ácida en la zona NW y SE (Arroyo et al., 2000). El día 23 setiembre tuvo lugar la actividad más importante, al menos 27 flujos piroclásticos sucesivos descendieron por el flanco NNE del volcán, hacia la laguna Cedeño. El evento estuvo acompañado de numerosas explosiones, así como de columnas de ceniza y gas (Arroyo et al., 2000; Alvarado & Soto, 2002). Se reportaron al menos 22 pulsos de flujos piroclásticos por el flanco NNE del volcán, acompañados de nubes de ceniza fina acarreada hacia el SW (a unos 12 km. de la fuente) (Arroyo et al., 2000; Alvarado & Soto, 2002).

En octubre y noviembre de ese año la actividad explosiva fue de escasa magnitud, baja frecuencia y de poca altura (Arroyo & Taylor 2002), manteniéndose constante hacia mediados del 2001.

En la relación de porcentaje de ceniza fina recolectada para el primer periodo con respecto a la ceniza gruesa, se denota una baja producción de ceniza fina, que podría interpretarse como un decrecimiento en la actividad explosiva, o un incremento en la energía del sistema volcánico, lo cual pudo provocar que las cenizas gruesas alcanzaran a la casetilla C. La transición hacia el ciclo II se da entre los últimos días del mes de agosto 1993 culminando el ciclo con una baja productividad de ceniza, quizá asociado a la posterior extrusión de lava.

Para el Periodo 2, que se extiende desde el 17 de marzo de 1993 al 23 de enero de 1995, se denota un aumento considerable en la cantidad de ceniza fina recolectada con respecto al semestre anterior, que se evidencia hacia mediados de marzo de 1993. Es un ciclo relativamente corto que se extiende más o menos hasta comienzos del 95. La media de la cantidad (%) de ceniza recolectada es similar al primer periodo, pero con un desfase bastante considerable en la proporción de porcentaje ceniza fina con respecto al porcentaje de ceniza gruesa, siendo considerablemente mayor el porcentaje de ceniza fina recolectada. Esto se interpreta como un ciclo de mayor explosividad del volcán, debido a una mayor fragmentación magmática durante la segunda mitad de este año que condujo a la producción de mayor cantidad de material de granulometría fina (< 300  $\mu$ ) para este periodo.

Para el Periodo 3, el cual comprende del 24 de enero de 1995 al 26 de marzo de 1998, se observa un incremento en la media móvil del porcentaje de ceniza gruesa, para inicios de 1995, como respuesta a una tendencia decreciente en la actividad explosiva que se venía dando desde los últimos meses del 94. Durante todo el 95, la actividad aún muestra signos de actividad explosiva considerable, lo que hace suponer al Periodo 2 como un evento eruptivo caracterizado por una alta fragmentación, relativamente aislado.

El periodo 4, ubicado entre el 27 de marzo de 1998 y el 27 de julio de 2001, se caracteriza por un alto porcentaje de ceniza fina recolectada en la casetilla C, la cual se ubica en el flanco oeste del volcán, lo cual se interpreta como un periodo de alta explosividad. Lo anterior probablemente esté relacionado a la producción de magma de relativa mayor viscosidad, aunado a una alta tasa de exsolución gaseosa por despresurización en el conducto, generando actividad del tipo vulcaniana.

### **Análisis de las casetillas C, D y V de enero del 2004 a mayo del 2006**

La cantidad de ceniza total recolectada durante este periodo de tiempo para la casetilla C es de 68,53 gramos, para la casetilla V de 57,47 gramos y para la D es 44,70 gramos (Tabla 2). La figura 3 presenta la relación entre la cantidad de ceniza recolectada y la distancia de las estaciones con respecto al cráter, donde la estación C es la que se encuentra más cerca del mismo, seguida por la V y luego la D. La cantidad de ceniza disminuye conforme nos alejamos del cráter.

Analizando el comportamiento del volcán durante el tiempo, en las diferentes casetillas se pueden definir tres periodos de mayor o menor cantidad de ceniza.

#### **Periodo 1**

Inicia el día 06/01/2004 y finaliza el 12/08/2004. El análisis realizado mostró que este periodo se caracteriza por presentar fluctuaciones notables en la cantidad de ceniza en las diferentes estaciones, siendo la casetilla C la que presenta el peso máximo que corresponde con 9,77 gr. (Figs. 4 y 5b). El comportamiento de las curvas de peso en las diferentes estaciones es muy similar durante el tiempo, solamente existe una variación en la recolección del día 03/03/2004 en la estación V, donde el peso es mayor que en las otras dos estaciones. El análisis granulométrico demostró, que el porcentaje de ceniza muy fina a polvo predomina (Figs. 5a y 5b).

La actividad de este periodo fue sintetizada a partir de un trabajo de Abarca & Matamoros (2006), quienes resumen la actividad del volcán Arenal desde el 2004 hasta el 2006. De dicha compilación se desprende que para los meses de enero, febrero, marzo y abril del 2001 la actividad eruptiva fue baja, tanto por el número de erupciones como por la cantidad de material piroclástico eyectado. Pocas erupciones produjeron columnas de ceniza superior a los 500 m sobre el cráter C. Los flancos nordeste, este y sureste fueron afectados por la caída de material piroclástico. La comparación de esta información con los datos de cenizas recolectadas no presenta una correlación clara con las fluctuaciones que se muestran a inicios de este periodo.

Para mayo, tanto la actividad explosiva como la efusiva descendieron. En junio y julio del mismo año, la actividad piroclástica siguió manteniéndose baja y los flancos noreste, este y sureste siguen siendo afectados por la caída de material piroclástico. En este periodo la actividad explosiva incrementó y el día 6 de julio del 2004, el volcán, Arenal inició la producción de flujos piroclásticos. El flujo piroclástico alcanzó sectores que previamente no habían sido afectados en el flanco NE. Las nubes de ceniza fueron dispersadas por el viento predominante hacia el SW. Esta actividad se puede correlacionar con la parte final de este periodo (Fig. 4), el cual muestra un incremento, además, en el figura 5 muestra un leve aumento de la granulometría hacia ceniza fina.

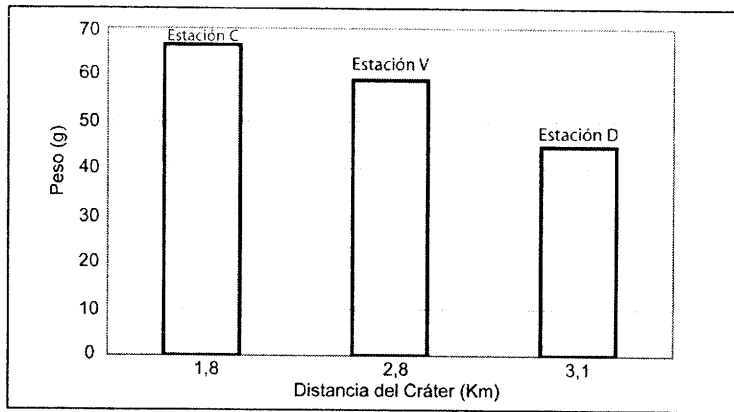


Figura 3. Peso total (gramos) en las estaciones de recolección C, V y D para el periodo entre el 06/01/04 al 30/05/2006.

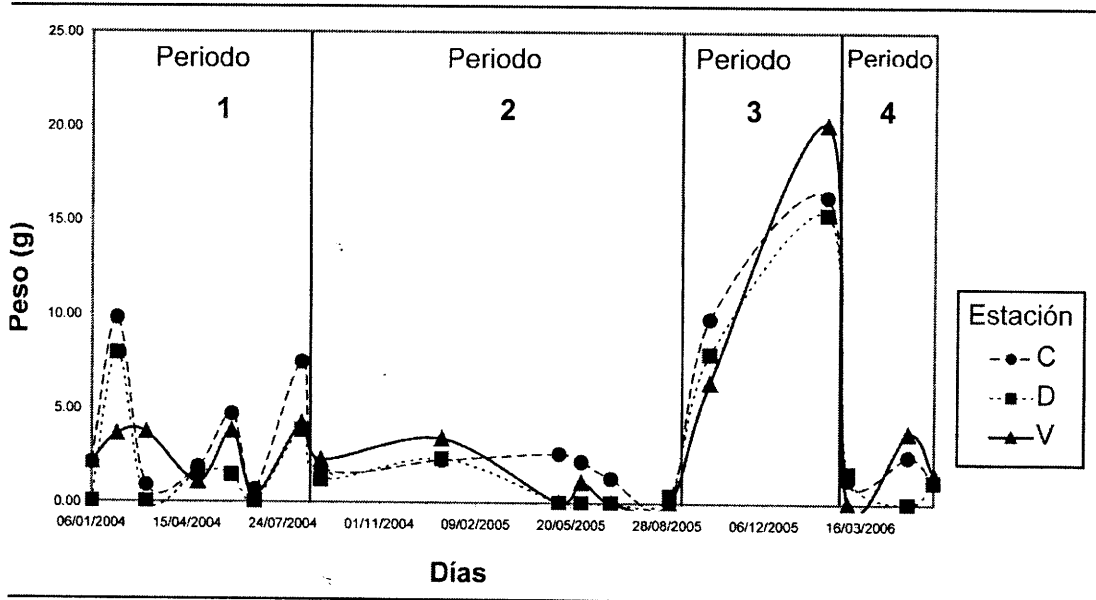


Figura 4. Peso (gramos) en las estaciones de recolección C, V y D para el periodo entre el 06/01/04 al 30/05/2006.

**Tabla 2.** Ceniza caída (gramos) en los recolectores de la red del volcán Arenal.

Fecha Recolección	C	D	V	Periodos
	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	
06/01/2004	2,08	0,00	2,14	Periodo 1
01/02/2004	9,77	7,92	3,61	
03/03/2004	0,89	0,00	3,70	
26/04/2004	1,84	1,54	1,06	
31/05/2004	4,68	1,44	3,78	
24/06/2004	0,66	0,00	0,36	
12/08/2004	7,45	3,82	4,20	
01/09/2004	1,84	1,20	2,26	Periodo 2
04/01/2005	2,24	2,34	3,40	
07/05/2005	2,60	0,00	0,00	
30/05/2005	2,18	0,00	1,10	
30/06/2005	1,30	0,00	0,00	
30/08/2005	0,00	0,40	0,00	Periodo 3
10/10/2005	9,77	7,92	6,40	
08/02/2006	16,24	15,30	20,09	Periodo 4
02/03/2006	1,28	1,64	0,00	
03/05/2006	2,53	0,00	3,76	
30/05/2006	1,18	1,18	1,60	
<b>Total</b>	<b>68,53</b>	<b>44,70</b>	<b>57,47</b>	

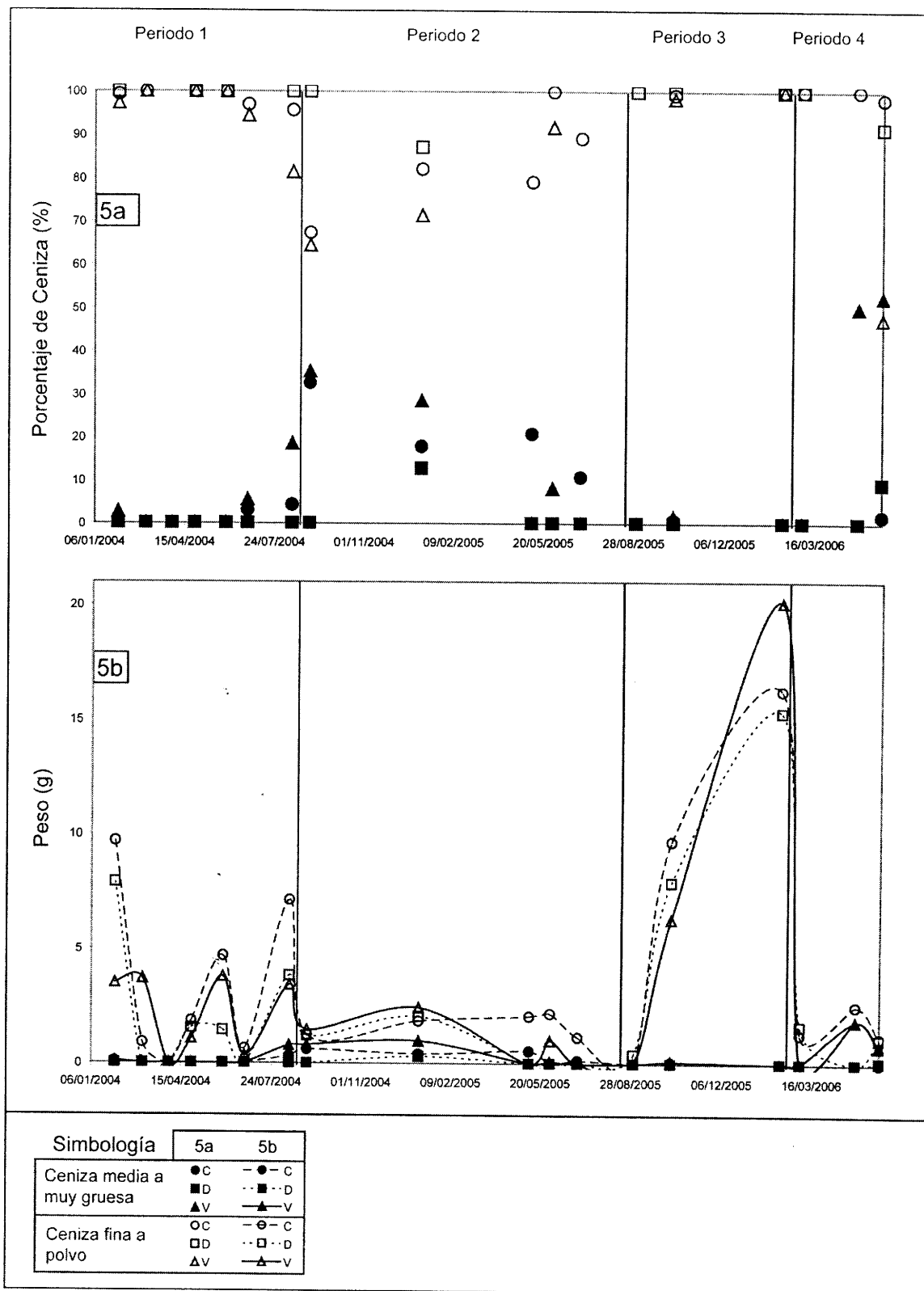


Figura 5. Análisis comparativo de la granulometría de las cenizas recolectadas. 5a: Porcentaje de ceniza media a muy gruesa y fina a polvo durante el 06/05/2004 al 30/05/ 2006. 5b: Peso de ceniza media a muy gruesa y fina a polvo durante el 06/05/2004 al 30/05/ 2006.

**Tabla 3.** Porcentaje de ceniza media a muy gruesa y fina a polvo en las diferentes estaciones.

Fecha	Estación			Estación			Periodos
	C	D	V	C	D	V	
	% ceniza media a muy gruesa (% > 300 $\mu$ )			% ceniza fina a polvo (% < 300 $\mu$ )			
01/02/2004	0,72	0,00	2,77	100,00	100,00	99,28	Periodo 1
03/03/2004	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
26/04/2004	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	
31/05/2004	0,00	0,00	0,00	96,97	100,00	100,00	
24/06/2004	3,03	0,00	5,56	95,70	0,00	96,97	
12/08/2004	4,30	0,00	18,57	67,39	100,00	95,70	
01/09/2004	32,61	0,00	35,40	82,14	100,00	67,39	Periodo 2
04/01/2005	17,86	12,82	28,53	79,23	87,18	82,14	
07/05/2005	20,77	0,00	0,00	100,00	0,00	79,23	
30/05/2005	0,00	0,00	8,18	89,23	0,00	100,00	
30/06/2005	10,77	0,00	0,00	0,00	0,00	89,23	
30/08/2005	0,00	0,00	0,00	99,28	100,00	0,00	
10/10/2005	0,72	0,00	1,56	100,00	100,00	99,28	Periodo 3
08/02/2006	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	Periodo 4
02/03/2006	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00	
03/05/2006	0,00	0,00	50,00	100,00	0,00	50,00	
30/05/2006	1,69	9,26	52,50	98,31	91,53	47,50	

**Tabla 4.** Peso (gramos) de ceniza media a muy gruesa y fina a polvo en las diferentes estaciones.

Fecha	Estación			Estación			Periodos
	C	D	V	C	D	V	
	g de ceniza media a muy gruesa (% > 300 $\mu$ )			g ceniza fina a polvo (% < 300 $\mu$ )			
01/02/2004	0,07	0,00	0,10	9,70	7,92	3,51	Periodo 1
03/03/2004	0,00	0,00	0,00	0,89	0,00	3,70	
26/04/2004	0,00	0,00	0,00	1,84	1,54	1,07	
31/05/2004	0,00	0,00	0,00	4,68	1,44	3,78	
24/06/2004	0,02	0,00	0,02	0,64	0,00	0,34	
12/08/2004	0,32	0,00	0,78	7,13	3,82	3,42	
01/09/2004	0,60	0,00	0,80	1,24	1,20	1,46	Periodo 2
04/01/2005	0,40	0,30	0,97	1,84	2,04	2,43	
07/05/2005	0,54	0,00	0,00	2,06	0,00	0,00	
30/05/2005	0,00	0,00	0,09	2,18	0,00	1,01	
30/06/2005	0,14	0,00	0,00	1,16	0,00	0,00	
30/08/2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	
10/10/2005	0,07	0,00	0,10	9,70	7,92	6,30	Periodo 3
08/02/2006	0,00	0,00	0,00	16,24	15,30	20,09	Periodo 4
02/03/2006	0,00	0,00	0,00	1,28	1,64	0,00	
03/05/2006	0,00	0,00	1,88	1,28	0,00	1,88	
30/05/2006	0,02	0,10	0,84	2,53	1,08	0,76	

## Periodo 2

Inicia con la recolección realizada el día 01/09/2004 y finaliza con la del día 30/08/2005. En este periodo se observa la existencia de cierta estabilidad y tranquilidad en la producción de ceniza del volcán, debido a que los pesos no presentan grandes variaciones durante el tiempo y son inferiores a 4 gramos en las diferentes recolecciones (Figs. 4 y 5b y Tabla 3). El comportamiento de las estaciones es similar entre ellos, lo que varía es que a inicios de este periodo la casetilla V es la que tiene los valores máximos de peso (2,26 y 3,4 gr, respectivamente).

La granulometría presenta variaciones debido a que el porcentaje de ceniza gruesa aumenta hasta un 35 % en algunos casos (Tabla 4 y Fig. 5a), lo cual es muy es distintivo de este periodo.

En el mes de agosto del 2004, precisamente el día 25, se produjeron varios flujos piroclásticos, los cuales descendieron hacia el flanco noreste. El 15 de septiembre, también se produjeron varios flujos piroclásticos los cuales igualmente descendieron hacia el flanco noreste. Los flancos NE, E y SE al igual que para el periodo 1 continuaron siendo afectados por la caída de material piroclástico. En octubre, las erupciones incrementaron, un 2% y en los meses de noviembre y diciembre, la actividad se mantuvo similar se mantuvo similar. En enero del 2005 se presentó un decrecimiento en un 26% en las erupciones y febrero un incremento en un 42% (Abarca & Matamoros, 2006). A inicios de marzo se observo un emplazamiento de una colada emitida con rumbo suroeste, en abril se desprenden bloques que se depositan unos hacia el suroeste. Con respecto al mes de marzo las erupciones descendieron en un 35%. Para mayo, la colada ubicada hacia el SW, producía pequeñas avalanchas esporádicas cuyos bloques lograban alcanzar el bosque, provocando pequeños incendios (Abarca & Matamoros, 2006).

No se puede establecer una correlación entre los datos de cenizas y las diferentes actividades; el aumento de la granulometría se puede deber tanto a los flujos piroclásticos como a las avalanchas esporádicas.

## Periodo 3

Comienza el día 10/10/2005 y finaliza el día 08/02/2006. Este periodo muestra un notable aumento en la cantidad de ceniza recolectada. La estación C es la que presenta los mayores valores de peso al inicio del periodo, siendo superada posteriormente por la estación V, en la que se registró el peso máximo de 20,09 gr (Figs. 4 y 5b y Tabla 3). El comportamiento de las curvas de peso en las 3 estaciones es muy similar durante el tiempo (Figs. 4 y 5b).

El análisis granulométrico muestra que todas las cenizas depositadas varían de finas a polvo (Fig. 5a y Tabla 5), lo cual es similar al periodo 1.

De junio a julio del 2005, las erupciones incrementaron de 11 a un 16% y para agosto hasta un 28%; pero en setiembre, decrecieron a un 8% (Abarca & Matamoros, 2006).

En octubre, los eventos asociados a erupciones se incrementaron en un 13% y los meses de noviembre y diciembre presentaron una serie de flujos piroclásticos en los cuales los depósitos fueron emplazados hacia el oeste. En noviembre y diciembre del

mismo año (2005) las erupciones incrementaron en un 28%. En los meses desde enero hasta febrero del 2006, la actividad eruptiva es baja. En febrero se presentaron dos flujos piroclásticos para los días 2 y 12 del mismo mes y en marzo, las erupciones incrementaron en un 10%. Los datos consultados no especifican el tipo de actividad para los diferentes meses (Abarca & Matamoros, 2006).

En este periodo sí se observa en las Figuras 4 y 5b el aumento de la actividad, pero no se puede correlacionar la granulometría con una actividad específica.

#### **Periodo 4**

Inicia el día 02/03/2006 y finaliza el 30/05/2006. Presenta un decaimiento en la cantidad de ceniza recolectada, siendo similar al periodo 2 (Fig. 4 y Tabla 2). El porcentaje de ceniza fina con respecto a la gruesa disminuye para el final del periodo, presentando una proporción de 50% para ambas, lo cual es diferente con respecto a todos los otros periodos (Figs. 5 a, b y Tablas 3 y 4).

Para los meses de abril y mayo del 2006, el cráter C, continúa con la emisión permanente de erupciones estrombolianas y ocasionales avalanchas del frente de colada. El día 1 de abril ocurrió un pequeño flujo piroclástico producto del desprendimiento de un frente de lava hacia el sector SW. En abril, las erupciones decrecieron en un 17%. Para mayo, los eventos asociados a erupciones incrementaron en un 9% (Abarca & Matamoros, 2006).

Para este periodo se observa la existencia de cierta correlación entre la cantidad de ceniza recolectada a inicios del mismo y el decrecimiento de la actividad. Posteriormente presenta un aumento en la cantidad de cenizas a finales de este periodo, la cual esta acompañada con un incremento de la actividad. No se puede determinar el tipo de actividad relacionada, posiblemente el aumento de la granulometría a finales del periodo sea producido por los flujos piroclásticos como se plantea para el periodo 2.

#### **Cálculos de ceniza en el cráter**

En el Tabla 5 se muestra la ceniza caída en [(gr./m<sup>2</sup>)/día] para las 3 casetillas de la red de monitoreo así como los resultados de la cantidad de ceniza calculada mediante la fórmula planteada en la metodología. Como es de esperarse la tendencia de la cantidad de ceniza que cae en el cráter es similar a las de la red debido a que esta en función de la fórmula (Fig. 6).



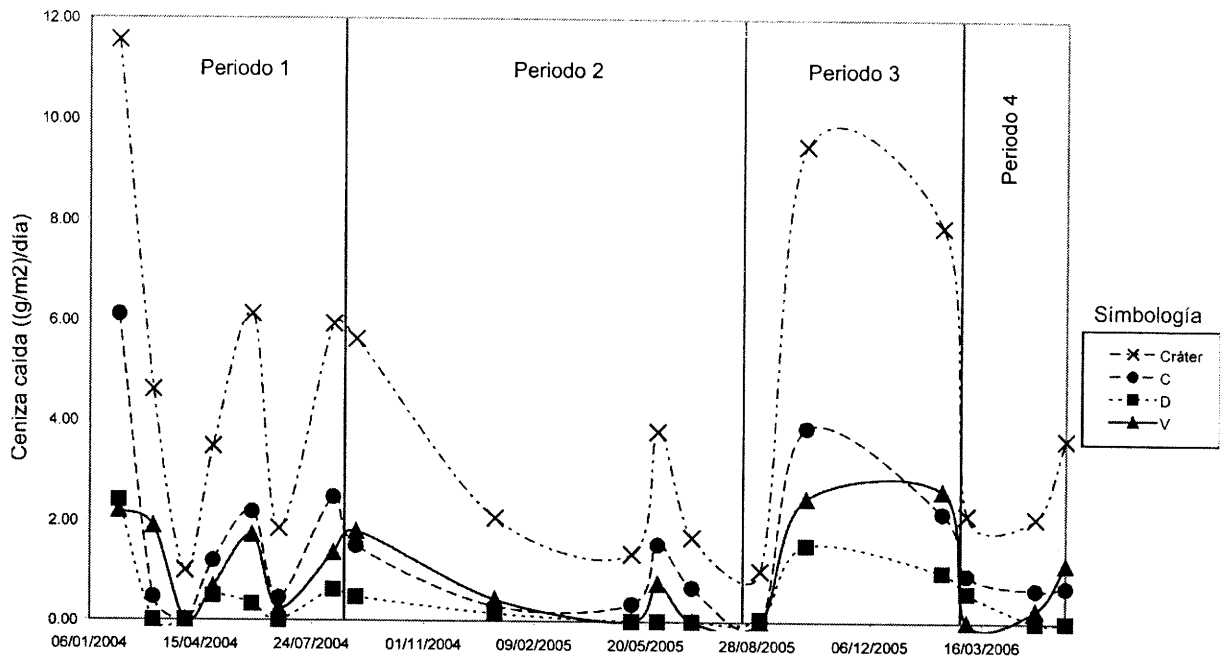


Figura 6. Ceniza caída en los recolectores de la red y en el cráter del volcán durante el 06/01/2004 al 30/05/2006.

Tabla 5. Ceniza caída [(gr./m<sup>2</sup>)/día] en los recolectores del volcán Arenal y en cráter del volcán.

Fecha Recolección	Cráter	C	D	V	Periodos
01/02/2004	11,56	6,10	2,41	1,30	Periodo 1
03/03/2004	4,61	0,47	0,00	1,89	
26/04/2004	3,48	1,19	0,49	0,42	
31/05/2004	6,12	2,17	0,32	1,02	
24/06/2004	1,84	0,45	0,00	0,21	
12/08/2004	5,93	2,47	0,62	0,98	
01/09/2004	5,63	1,49	0,47	1,64	Periodo 2
04/01/2005	2,06	0,29	0,15	0,31	
07/05/2005	1,34	0,34	0,00	0,00	
30/05/2005	3,80	1,54	0,00	0,48	
30/06/2005	1,68	0,68	0,00	0,00	
30/08/2005	1,02	0,00	0,05	0,00	
10/10/2005	9,49	3,87	1,53	0,64	Periodo 3
08/02/2006	7,88	2,18	1,00	0,87	Periodo 4
02/03/2006	2,14	0,94	0,59	0,00	
03/05/2006	2,09	0,66	0,00	0,25	
30/05/2006	3,77	0,71	0,35	1,17	

## Conclusiones

Para el análisis de los datos de la casetilla C, se ha tratado de correlacionar eventos explosivos importantes con los datos de recolección de ceniza en esta casetilla. En general, se concluye que no existe una correspondencia marcada entre los registros de caída de ceniza y la recopilación de la actividad explosiva del volcán para este periodo. Aún así existen algunas correspondencias muy localizadas, tanto temporal como espacialmente.

Entre el periodo enero 2004 - mayo 2006, se determinaron 4 periodos con base en la ceniza recolectadas en las estaciones C, D y V. Los periodos 1 y 3 presentaron un aumento en la cantidad de ceniza recolectada que corresponde principalmente con ceniza fina (fina:  $< 300 \mu$ ) mientras que los periodos 2 y 4 tienen una menor cantidad de ceniza y presentan un aumento en la granulometría de la ceniza gruesa (gruesa:  $\geq 300 \mu$ ). No se generaron datos sistemáticos al correlacionar la actividad del volcán, solo el aumento de la granulometría para el periodo 2 y 4 se relaciona con ciertos flujos piroclásticos pero no se puede aplicar a todos los flujos piroclásticos por lo que es poco consistente.

## Referencias

- Abarca, S. & Matamoros, R., 2006. Actividad del volcán Arenal durante el periodo 2004-2006. - Boletín OSIVAM, presente volumen; San José, Costa Rica.
- Alvarado, G.E. & Soto G. J., 2002. Pyroclastic flow generated by crater-wall collapse and outpouring of the lava pool of Arenal Volcano, Costa Rica. -Bulletin of Volcanology , 63: 557-568.
- Arroyo, I. & Taylor, W., 2002. La actividad del Volcán Arenal durante el año 2001. -Boletín OSIVAM 13(25): 10-26; San José, Costa Rica.
- Arroyo, I., Alvarado, G. E., Taylor, W., Madrigal, L. & Arias, F., 2000. La actividad del Volcán Arenal durante el año 2000. -Boletín OSIVAM, 12(23-24): 15-29; San José, Costa Rica.
- Arroyo, I., Barquero, R., Madrigal, L. & Arias, F., 1999. Sinopsis de la actividad del Volcán Arenal durante los años 1998 y 1999. -Boletín OSIVAM, 11 (21-22): 21-32; San José, Costa Rica.
- Cole, P. D., Fernández, E., Duarte, E. & Duncan A. M., 2005. Explosive activity and generation mechanisms of pyroclastic flows at Arenal volcano, Costa Rica between 1987 and 2001. -Bull. Volcanol., 67: 695-716.
- GVN, 1997. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Smithsonian Institution, 22 (3,5,11): 5, 7, 10 -11; Washington D.C.
- GVN, 1999. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Smithsonian Institution, 24 (3,6): 10, 10; Washington D.C.
- GVN, 2003. Arenal. -Bulletin of the Global Volcanism Network, Smithsonian Institution, 28 (7,8,9): 15-16, 8-9, 14; Washington D.C.
- Soto, G, J., 1997. La actividad del Volcán Arenal durante 1995. -Boletín OSIVAM, 8 (15-16): 56-61; San José, Costa Rica.
- Soto, G, J., 1998. Ceniza eruptada por el volcán Arenal, 1992-1997. -Boletín OSIVAM, 10 (19-20): 14-24, 1997; San José, Costa Rica.
- Soto, G, J. & Arias, F., 1998. Síntesis de la actividad del Volcán Arenal, año 1996. -Boletín OSIVAM, 9 (17-18): 11-18; San José, Costa Rica.

Boletín OSIVAM	Año 16-17, No. 28-29	26-36	San José, Costa Rica, agosto 2006
----------------	----------------------	-------	-----------------------------------

## Actividad del volcán Arenal durante el período 2004-2006

[Activity of the Arenal volcano during the period 2004-2006]

**Sonia Abarca & Raphael G. Matamoros**

**Estudiantes de la Escuela Centroamericana de Geología, UCR**

Abarca, S. & Matamoros, R.G., 2006. Actividad del volcán Arenal durante el período 2004-2006. -Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29): 26-36. San José.

### Resumen

La actividad del volcán Arenal en el período 2004 al 2006 se caracterizó por emisión de gases, extrusión de coladas de lava, lluvia ácida, avalanchas frías, flujos piroclásticos y crecimiento de domos. Su continua actividad, aunado a la formación de domos, lo hacen propenso a flujos piroclásticos de alcance moderado. Por lo tanto, es pertinente el monitoreo y vigilancia constante, por la gran cantidad de turistas que visitan la zona durante todo el año, así como también, por la seguridad de los pueblos cercanos.

### Abstract

The activity of the Arenal volcano during the period 2004 to the 2006 is characterized by gas emission, lava flows, explosion, acid rain, cold avalanches, piroclastic flows and domes growing. This diverse activity indicates that the volcano stays constant in activity and is important to emphasize the occurrence of piroclastic flows as one of the most dangerous events during eruptions by dome collapse. Therefore, it is pertinent the volcano monitoring due to the great amount of tourists who visit the zone the year throughout, as well as, by the security of the near towns.

## **Introducción**

El volcán Arenal (~1720 m s.n.m.) se encuentra ubicado al este del lago del mismo nombre, que fue ampliado en su área debido a la creación de un proyecto hidroeléctrico.

Las primeras erupciones del Volcán Arenal tuvieron lugar hace unos 7000 mil años, por lo que se dio una coexistencia de actividad con el antiguo volcán Chato, el cual cesó su fase eruptiva hace 3500 años aproximadamente (Soto & Alvarado, 2006).

La evolución del Volcán Arenal ha sido caracterizada por fuertes erupciones explosivas de tipo estromboliano, vulcaniano y pliniano que se ha dado en intervalos de cientos de años, así como también periodos de actividad efusiva, con los cuales se ha ido construyendo el cono. El periodo eruptivo actual inició con una fuerte explosión ocurrida en 1968, antes de la cual los pobladores los llamaban Cerro Arenal. Desde esta fecha el volcán ha presentado una actividad eruptiva continua acompañada de lentas efusiones de lava y emisión ocasional de flujos piroclásticos (Soto & Alvarado, 2006).

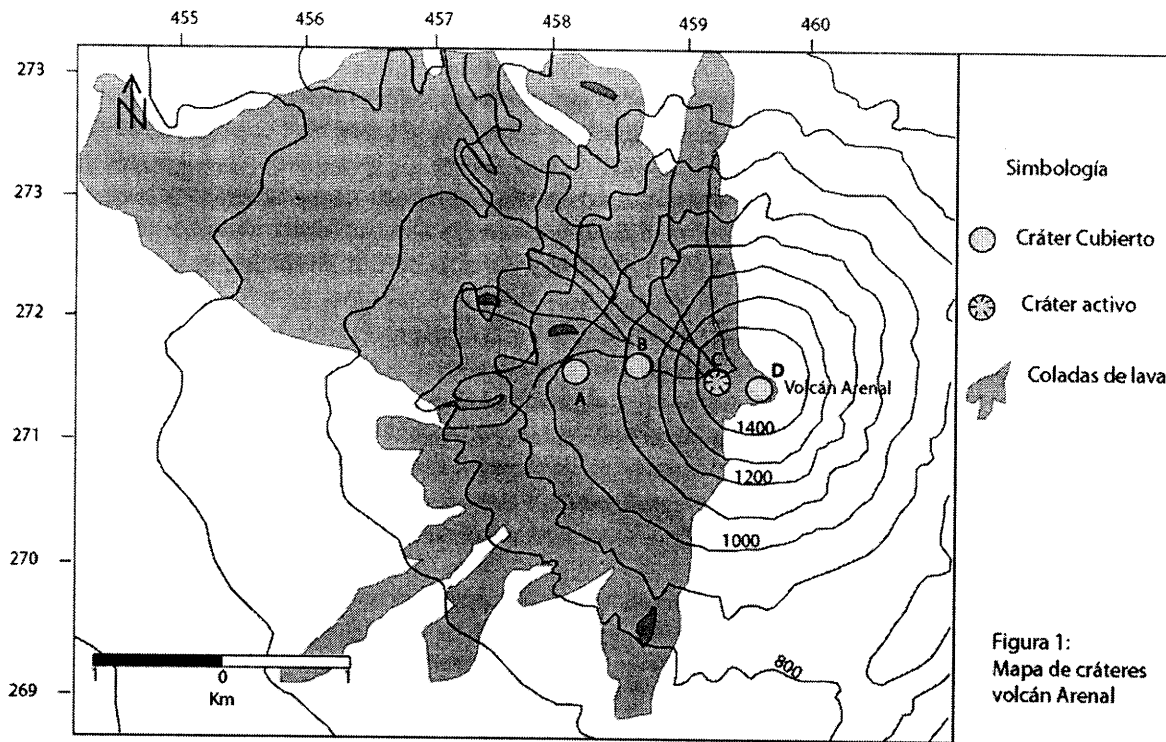
Debido a su alta peligrosidad, su constante actividad y la importancia económica y turística para nuestro país, este volcán ha sido y continúa siendo estudiado con detenimiento. Por esta razón, este trabajo pretende realizar una compilación y en parte una reconstrucción de la actividad del mismo desde el año 2004 al presente (junio del 2006), esto con el fin de presentar información útil sobre su control, así como también para analizar la actividad del volcán desde el punto de vista académico y científico para futuros trabajos.

Esta recopilación, se realizó como parte de un trabajo de investigación, mediante la revisión de cada mes del período en estudio de la sección "Estado de los volcanes de Costa Rica", de la página web del OVSICORI-UNA, donde se encuentra un resumen de la actividad de cada volcán activo en Costa Rica para cada mes.

### **Períodos de actividad 2004-2006**

#### **Enero - febrero 2004**

El cráter C (Fig. 1) presentó emisión permanente de gases, coladas de lava, esporádicas erupciones estrombolianas y ocasionales avalanchas del frente de la colada.



**Figura 1.** Mapa de caracteres, volcán Arenal.

La actividad eruptiva fue baja para ambos meses, tanto por el número de erupciones como por la cantidad de material piroclástico eyectado. Pocas erupciones produjeron columnas de ceniza superior a los 500 m sobre el cráter C.

Los flancos nordeste, este y sureste fueron afectados por la caída de material piroclástico y lluvia ácida, lo cual aunado a los altos montos de precipitación, fuertes pendientes y material poco consolidado, produjo ensanchamiento de cárcavas, lo que a su vez originó pequeñas avalanchas frías, en las quebradas Calle de Arenas, Manolo, Guillermina y río Agua Caliente. Se dio la emisión una colada de lava hacia el flanco noreste del volcán.

El cráter D presentó actividad fumarólica.

### **Marzo - mayo 2004**

El cráter C continuó con la emisión permanente de gases, coladas de lava, esporádicas erupciones estrombolianas y ocasionales avalanchas del frente de la colada.

La colada de lava que estaba siendo emitida hacia el flanco nordeste se detuvo en el mes de marzo. Una nueva colada de lava empezó a ser emitida hacia el flanco nordeste, sobre el canal anterior, a una altura de aproximadamente 1400 m s.n.m. Durante el día 12 de marzo, a las 17: 45 hora local se originó una avalancha del frente de colada hacia el flanco nordeste y se detuvo a los 850 m s.n.m. Cerca del borde del cráter se desprendieron bloques hacia el flanco norte, algunos de los cuales llegaron a alcanzar la vegetación.

La actividad eruptiva continuó siendo baja, tanto por el número de erupciones como por la cantidad de material piroclástico eyectado. De igual manera, pocas erupciones produjeron columnas de ceniza superior a los 500 m sobre el cráter C. El cráter D se mantuvo presentando actividad fumarólica.

En los flancos nordeste, este y sureste se mantuvo la caída de material piroclástico y lluvia ácida, generando pequeñas avalanchas frías, en las mismas quebradas del período anterior.

#### **Junio - julio 2004**

La actividad efusiva se mantuvo similar con respecto al periodo precedente. Una colada de lava que empezó a ser emitida desde el cráter C hacia el flanco nordeste en el período anterior se detuvo y una nueva colada empezó a ser emplazada en ese mismo flanco en junio, y en julio una nueva colada comenzó a ser emitida hacia el flanco norte.

La actividad piroclástica se mantuvo baja, pero incrementó con respecto a mayo en un 8%, siendo los flancos noreste, este y sureste siendo afectados por la caída de material piroclástico y lluvia ácida. El cráter D continuó con la actividad fumarólica.

El día 6 de julio del 2004, a partir de las 13:19 p.m. hora local, el volcán Arenal inició la producción de flujos piroclásticos que descendieron por el flanco NE afectando un área previamente afectada por los flujos piroclásticos ocurridos entre 1999 y 2003. El flujo piroclástico tuvo dimensiones moderadas y alcanzó sectores que previamente no habían sido afectados en el flanco NE. Las nubes de ceniza fueron dispersadas por el viento predominante hacia el SW. Al menos dos sectores en la parte distal de los depósitos mostraron efectos de quemadura en el bosque (Figs. 2 y 3).

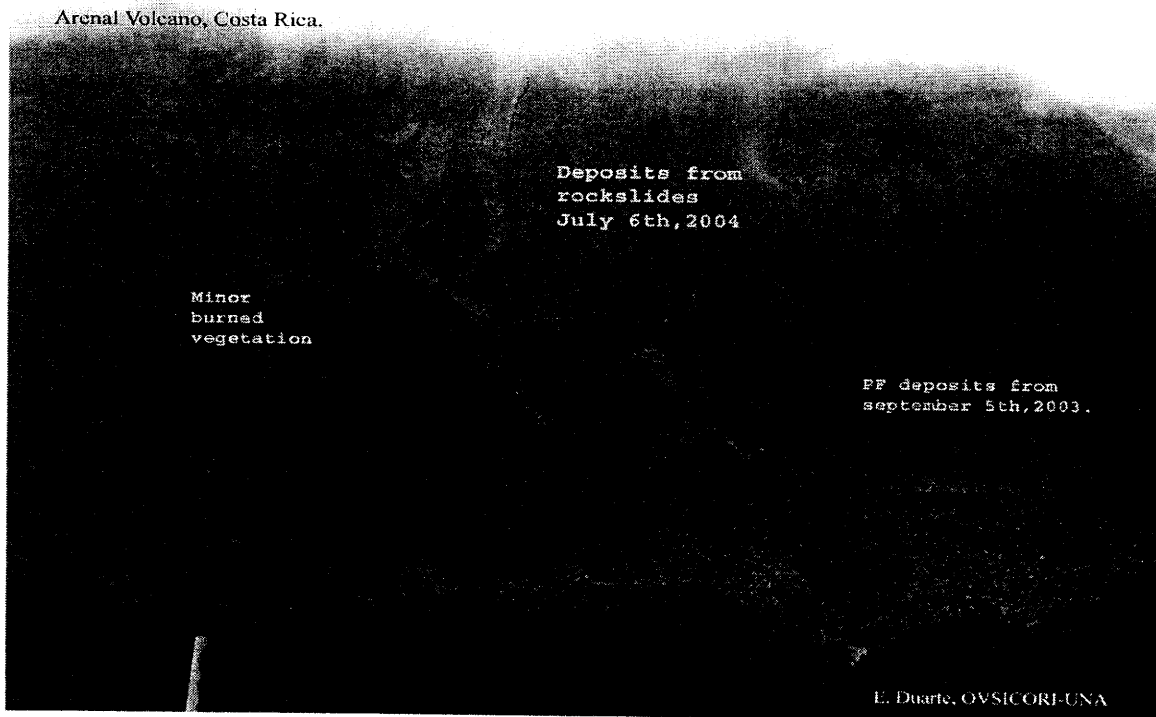
Observaciones posteriores al 6 de julio del 2004 por personal de la UNA, sugirieron que estos eventos se produjeron por el desprendimiento del frente de la colada de lava, la cual estaba siendo emplazada sobre una pendiente muy fuerte.

#### **Agosto 2004 - enero 2005**

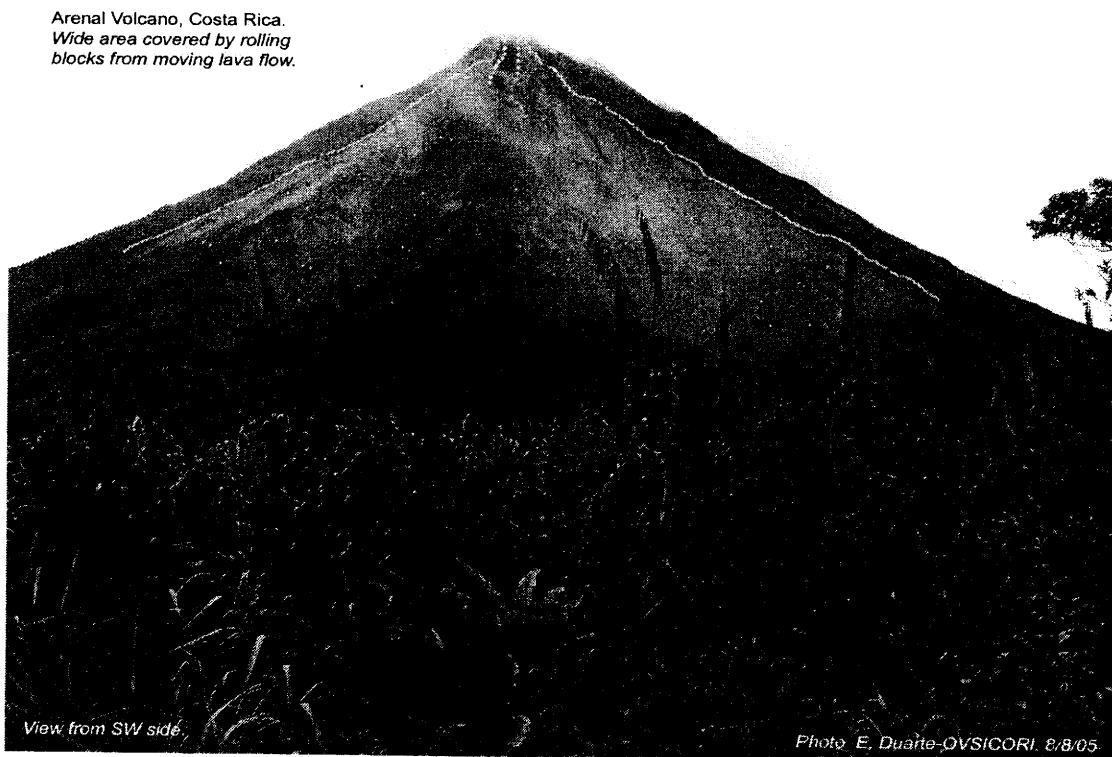
La colada de lava que empezó a ser emitida hacia el flanco nordeste en el mes junio se mantuvo activa. Algunos bloques se desprendieron del borde norte del cráter hacia ese flanco. La actividad eruptiva siguió siendo baja, aunque con respecto a los meses anteriores ha aumentado el número de erupciones, algunas de las cuales han generado columnas cuyas alturas logran alcanzar los 500 metros sobre el cráter C.

Durante el miércoles 25 de agosto se produjo varios flujos piroclásticos producto del colapso del frente de colada, los cuales descendieron hacia el flanco noreste. De igual modo, durante el día 15 de setiembre, a eso de las 17:45 hora local, se produjeron varios flujos piroclásticos producto del colapso del frente de colada los cuales descendieron hacia el flanco noreste.

Los flancos nordeste, este y sureste continuaron siendo afectados por la caída de material piroclástico y lluvia ácida. El cráter D continúa con la actividad fumarólica.



**Figura 2.** Vista del flanco nordeste del volcán Arenal donde se emplazaron los depósitos de los flujos piroclásticos generados el 6 de julio del 2004. Cortesía de E. Duarte, UNA.



**Figura 3:** Vista del Volcán Arenal desde el Flanco SW, mostrando el área cubierta por el movimiento de bloques que se desprenden cerca de la cima del cráter C. Cortesía de E. Duarte, UNA.

## **Febrero 2005**

Durante casi todo el mes, dadas las condiciones del tiempo, el volcán se mantuvo nublado, despejándose solo los últimos días del mes. Se observó que la colada de lava que estaba siendo emitida hacia el flanco nordeste desde el mes de junio se detuvo y no se observó salida de lava por ningún otro flanco. Así, en cambio, se dio el crecimiento de un domo en el cráter C.

## **Marzo - abril 2005**

A principios del mes de marzo se observó el emplazamiento de una colada emitida con rumbo suroeste, la cual procede del domo al oeste del cráter C. A mediados del mes se observó un corto recorrido de la misma en la parte sumital y en el mes de abril se desprendieron bloques que se depositaron unos hacia el suroeste y otros un poco más hacia el oeste. Algunos de los bloques que salieron hacia el suroeste lograron alcanzar la vegetación provocando pequeños incendios en gramíneas y en el bosque (Fig. 3).

En abril una nueva colada comenzó a ser emitida hacia el flanco sureste, desprendiéndose bloques del frente y provocando pequeños incendios. Algunos bloques salieron hacia el flanco sur.

La actividad eruptiva aumentó en julio con respecto a marzo, sin embargo sigue siendo baja.

## **Mayo 2005**

La colada de lava que estaba siendo emitida hacia el flanco suroeste en el periodo anterior se encontraba activa, de la misma se desprendían bloques de muy cerca de la cima y se depositaban unos hacia el suroeste y otros se mueven un poco más oeste.

El frente de la colada que comenzó a ser emitida hacia el flanco sureste presentó poco movimiento al finalizar el mes. Sin embargo, se produjeron pequeñas avalanchas de la parte lateral de la colada en forma esporádica, cuyos bloques lograron alcanzar el bosque, provocando incendios.

## **Junio - julio 2005**

El frente de la colada que comenzó a ser emitida hacia el flanco sureste en el mes de abril continuó activa. Se producían pequeñas avalanchas de la parte lateral de la colada en forma esporádica, cuyos bloques lograban alcanzar el bosque provocando incendios.

## **Agosto - octubre 2005**

La colada que estaba siendo emitida hacia el flanco sureste en el periodo anterior se detuvo a 1300 m de altura, aproximadamente.

La colada de lava emitida hacia el flanco suroeste desde marzo se encontraba activa en el mes de octubre y los bloques se desprendían de muy cerca de la cima y se depositaban hacia el suroeste, oeste y noroeste, alcanzando una altura aproximada de 1000 m.



### **Noviembre - diciembre 2005**

A partir de las 15 horas del día 2 de noviembre se reportó una serie de flujos del volcán Arenal (Fig. 4). El jueves 3 de noviembre se observó que la colada que generó los desprendimientos estaba siendo emitida hacia el suroeste y el colapsamiento y los depósitos fueron emplazados hacia el oeste. Dicha colada se detuvo en diciembre.

El flujo alcanzó hasta unos 1000 m y debido al recorrido de los materiales se observa una cóncava alisada por la avalancha de los materiales incandescentes en dirección oeste (frente al mirador del Parque Nacional). En un sector de unos 75 m de ancho, donde la pendiente más pronunciada cambia (hacia la base del volcán), es donde se acumuló la mayor parte de los materiales.

En diciembre las condiciones se mantuvieron similares, a excepción de la erupción ocurrida el 15 de diciembre de 2005.

### **Enero - marzo 2006**

Dos nuevas coladas comenzaron a ser emitidas, una con rumbo suroeste y otra hacia el flanco oeste. El frente de esta última se encontraba a una altura de 1350 m. Cerca del cráter se desprendían bloques hacia el flanco noroeste y suroeste.

La actividad eruptiva continuó siendo baja, al igual que en los meses anteriores, pero en el mes de febrero, se presentaron dos flujos para los días 2 y 12.

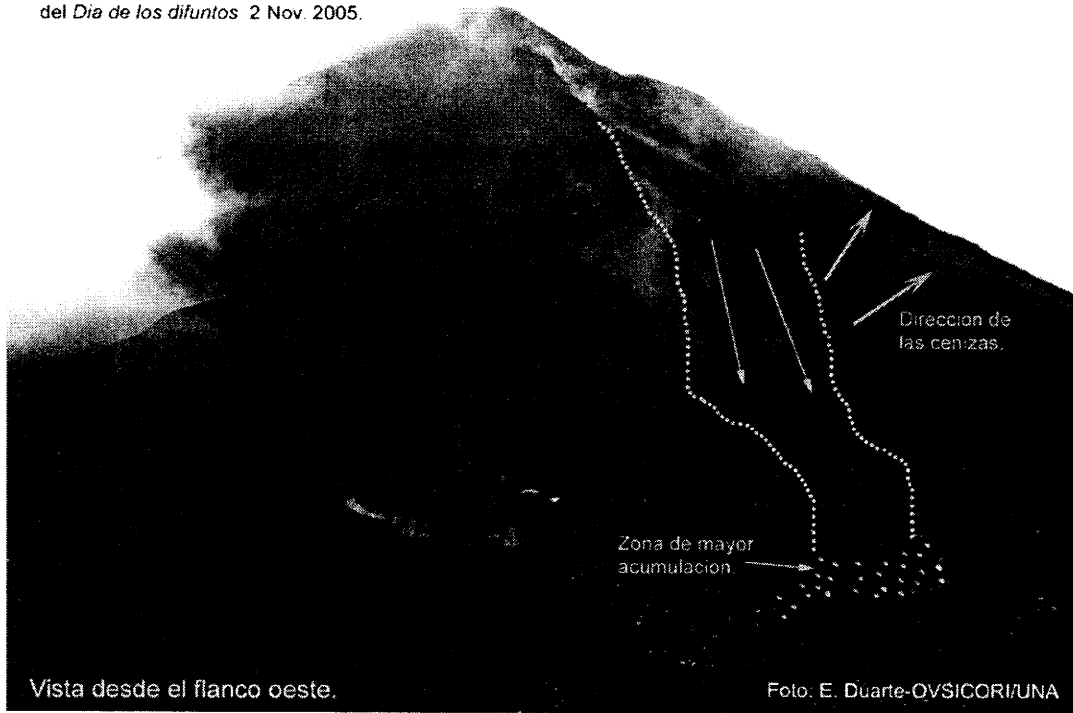
### **Abril - mayo 2006**

El cráter C, continuó con la emisión permanente de coladas de lava, gases, esporádicas erupciones estrombolianas y ocasionales avalanchas del frente de colada.

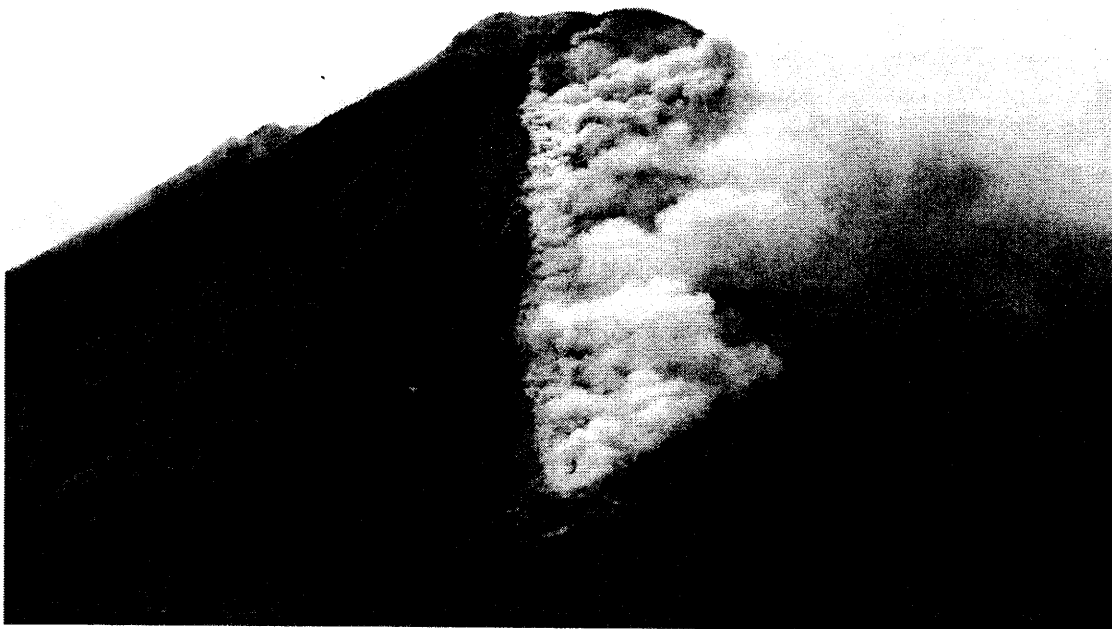
La colada de lava que estaba siendo emitida en febrero pasado con rumbo oeste se detuvo; en cambio, la colada de lava que estaba siendo emitida hacia el flanco suroeste se mantuvo activa también en mayo. Una nueva colada de lava comenzó a ser emitida a mediados del mes de abril hacia el flanco norte, e igualmente se mantuvo en mayo.

Los flancos nordeste, este y sureste continúan siendo afectados por la caída de material piroclástico y lluvia ácida, se siguen presentando pequeñas avalanchas frías. El día 1 de abril fue reportado un pequeño flujo piroclástico producto del desprendimiento de un frente de lava hacia el sector SW. También, el 10 de mayo se produjo otro flujo piroclástico (Fig. 5). El cráter D continúa con la actividad fumarólica.

Volcan Arenal, Costa Rica.  
Area afectada por el colapsamiento  
del *Dia de los difuntos* 2 Nov. 2005.



**Figura 4:** Flujo Piroclástico 02 de Nov. 2005. Cortesía de E. Duarte, UNA.



**Figura 5:** Flujo Piroclástico del 10 de mayo del 2006. Cortesía de Hotel y Restaurante Arenal KIORO.

### Discusión y conclusiones

En general, la actividad del volcán Arenal en el período 2004-2006, fue diversa ya que ha abarcado de emisión de gases, flujos piroclásticos hasta domos y coladas de lava; esto indica que este volcán se mantiene constante en actividad y es importante recalcar la ocurrencia de flujos piroclásticos como unos de los eventos más peligrosos durante erupciones por colapso de domo. Por lo tanto, es importante el monitoreo y vigilancia constante, en especial, como se mencionó anteriormente, por la gran cantidad de turistas que visitan la zona durante todo el año, así como también, por la seguridad de los pueblos cercanos.

En resumen, el volcán Arenal en el período 2004 al 2006 se caracterizó por los siguientes tipos de actividad (Fig. 6):

- 1) Emisión de gases
- 2) Emisión de coladas de lava
- 3) Explosiones
- 4) Lluvia ácida
- 5) Avalanchas frías
- 6) Flujos piroclásticos
- 7) Crecimiento de domos

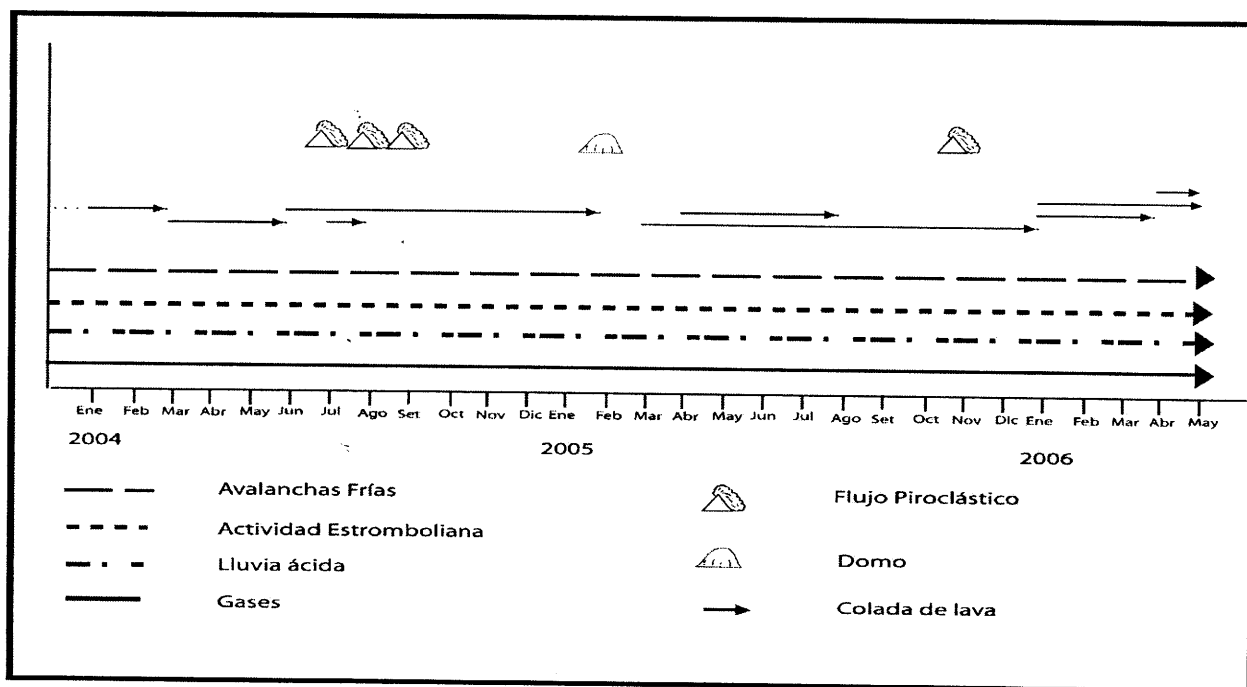


Figura 6. Actividad volcán Arenal 2004 – 2006.

**1- Emisión de gases:** La emisión de gases, se da principalmente del cráter C y se desarrolla de manera importante en los períodos enero 2004 – enero 2005 y abril – mayo 2006, sin embargo, parece haberse mantenido constante en la mayor parte del tiempo. Este tipo de actividad corresponde con uno de los más significativos para este volcán.

**2- Emisión de coladas de lava:** Esta actividad es al parecer característica del volcán, ya que se da en casi todos los períodos de tiempo, a excepción de febrero del 2005 y, por lo tanto, podría catalogarse como el tipo de actividad más permanente que presenta el volcán. A través de los años, el número de coladas ha variado; inicialmente, la actividad se caracterizó por presentar pocas coladas por año pero de larga duración, mientras que, a finales de los sesenta y durante la década de los ochenta, se observó un incremento en el número de coladas reportadas, tendencia que continúa y en la década de los noventa se dan los picos máximos de este período eruptivo con 10 coladas por año (Murillo & Ruiz, 2004). Al observar la figura 6, se obtiene que la actividad efusiva ha disminuido a 3 ó 4 coladas por año, sin embargo, parece que la actividad aumenta para el 2006, ya que se ha dado la efusión de 3 coladas entre los meses de enero y mayo.

La emisión de estas coladas proviene desde el cráter C y algunas coladas se mantuvieron activas hasta 10 meses; puede ocurrir además que se dé la emisión simultánea de dos coladas en un mismo lapso de tiempo. Suelen encontrarse acompañadas en varias ocasiones por el desprendimiento de bloques de la parte frontal y esporádicamente de zonas laterales de la misma. Algunos de estos bloques pueden alcanzar la base del volcán y crear incendios en los bosques cercanos. Generalmente, las coladas de lava fluyen varias direcciones del edificio volcánico (NE, N, SW y SE).

**3- Explosiones:** Fueron reportadas en la mayoría de los períodos del 2004-2006 cuando el volcán mantuvo pequeñas erupciones estrombolianas en el cráter C y sus depósitos hicieron crecer el cono algunos metros. Por lo tanto, no se observa cambios de ocurrencia en este tipo de actividad al ser comparada con el año 2003 (ver Taylor et al., 2004). Presentan una columna de ceniza asociada durante la erupción, la cual puede alcanzar más de 500 m de elevación en algunas ocasiones. Durante el período de estudio, las fechas de ocurrencia de los eventos piroclásticos se encuentran separadas por lapsos de 6 a 13 meses.

**4- Lluvia ácida:** Se encuentra asociada en ocurrencia con los eventos de desgasificación y se reporta para la mayoría de los períodos de estudio, y su precipitación ocurre en los flancos noroeste, este y sureste del volcán. La actividad fumarólica ocurre generalmente en el cráter D y se ha dado en la mayoría de los períodos, lo que evidencia que este cráter mantiene cierta actividad.

**5- Avalanchas frías:** Se originan a partir de los depósitos de piroclastos y discurren por los cauces de las quebradas Calle Arenas, Manolo, Guillermina y Agua Caliente. La ocurrencia de este tipo de eventos indica que los flancos del volcán presentan suficiente inestabilidad para dar origen a las avalanchas; esto también podría asociarse a eventos laháricos, cuyos disparadores deben ser principalmente fuertes lluvias en la zona.

**6- Flujos piroclásticos:** En el período de tiempo en estudio, ocurrieron seis eventos principales:

- 06 de julio del 2004
- 25 de agosto del 2004
- 15 de setiembre del 2004
- 02 de noviembre del 2005
- 01 de abril del 2006
- 10 de mayo del 2006

Esta actividad aumentó con respecto al 2003, en el cual se dio un único evento de varios flujos el 05 de setiembre del mismo año, mientras que para el 2004 fueron reportados 3 eventos.

Los eventos han sido producidos por el colapso de frentes de coladas o desprendimiento de las mismas. Sus depósitos se emplazaron en los flancos suroeste y nordeste del volcán. El flujo piroclástico del 06 de julio del 2004, produjo quemaduras en el bosque de la base del volcán. Este tipo de actividad parece haber tenido un incremento en su cantidad en el período julio - setiembre del 2004. Puede decirse, que estos eventos son característicos para el volcán Arenal, pero al mismo tiempo, representan un alto nivel de peligrosidad para los sectores aledaños al edificio volcánico en su flanco activo.

**7- Crecimiento de domos:** En febrero del 2005, se reportó el crecimiento de un domo en el sector oeste del cráter C, el cual, originó una colada de lava que discurrió por el flanco suroeste del volcán durante el período marzo - abril del 2005.

### Referencias

Murillo, S. & Ruiz, P., 2004. Datos paramétricos de las coladas de lava Arenal (Costa Rica) entre 1968-2002. -Boletín OSIVAM, 15 (27): 25-33, San José.

OVSICORI-UNA, 2006: Estado de los volcanes de costa Rica.  
<http://www.ovsicori.una.ac.cr/pag/estados05.html> (Consulta: 18 de abril del 2006).

Soto, G. & Alvarado, G.E., 2006. Eruptive history of Arenal volcano, Costa Rica. 7ka to present. J. Volcanol. Geotherm. Res.

Taylor, W., Madrigal, L. & Soto, G., 2004. La actividad del volcán Arenal durante el año 2003. - Boletín OSIVAM, 15 (27): 11-24, San José.

Boletín OSIVAM	Año 16-17, No. 28-29	37-47	San José, Costa Rica, agosto 2006
----------------	----------------------	-------	-----------------------------------

**Caracterización y variabilidad en el tiempo de la frecuencia en los “chugs” del volcán Arenal, entre junio del 2004 y junio del 2005.**

[Characterization and variability in time of the frequency in the “chugs” of Arenal volcano, between June of 2004 and June of 2005].

**Pedro Acosta**

acopedro@gmail.com

**Estudiante de la Escuela Centroamericana de Geología, UCR**

Acosta, P., 2006. Caracterización y variabilidad en el tiempo de la frecuencia en los “chugs” del volcán Arenal, entre junio del 2004 y junio del 2005. -Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29): 37-47. San José.

**Resumen**

Los tremores armónicos (“chugs”) asociados a las explosiones o “soplidos” (“whooshes”), analizados entre el 1 de junio del 2004 y 1 de julio del 2005, presentan frecuencias fundamentales que en su inicio tienen valores entre 0,97 y 3,1 Hz y en general aumentan progresivamente hasta valores máximos que alcanzan los 1,46 y 4,02 Hz. Además, tienen una variabilidad amplia del  $\Delta T$ , donde se registran eventos hasta de 25 min. Estos tremores pueden tener sólo una frecuencia fundamental o bien ésta puede acompañarse de sobretonos cuya frecuencia también aumenta proporcionalmente.

**Abstract**

The harmonic (“chugs”) tremors associated with explosions (“whooshes”), analyzed between June 2004 and June 2005, showed fundamental frequencies in its beginning of 0.97 and 3.1 Hz. In general they increase until 1.46 and 4.02 Hz, also they have a wide variability of  $\Delta T$ , where events of 25 min, can be recorded. These tremors can have only a fundamental frequency or even have harmonics in where also the frequency increases proportionally.

## Introducción

El Arenal es un estratovolcán, de 7000 años de edad (Soto et al., 1998a), localizado hacia el NW de Costa Rica, cuyas lavas son de composición basáltico andesítico de gran viscosidad, que contienen más del 50% del volumen de cristales (Melson, 1989). Hacia el norte se encuentra el volcán Chato con el cual forma un lineamiento NW-SE. Este volcán se encuentra en actividad eruptiva continua desde la erupción de 1968, la cual generó 78 muertes, devastó un área de 15 km<sup>2</sup> y afectó moderadamente 230 km<sup>2</sup>. Esta erupción se generó a lo largo de una fisura en el flanco oeste que formó tres cráteres: A, B y C. (e.g., Melson & Sáenz, 1973).

La actividad del Arenal se caracteriza principalmente por erupciones estrombolianas, flujos de lava en bloques, flujos piroclásticos esporádicos asociados al colapso de frentes de coladas de lava o de partes del borde del cráter, que son la mayor amenaza para creciente población de turistas que visitan las cercanías de este volcán (Alvarado & Soto, 2001). Esta actividad eruptiva genera una amplia variedad de señales sísmicas cuya descripción y clasificación ha variado en el tiempo según los diferentes autores (e.g., Alvarado et al., 1997; McNutt, 1997, Soto et al., 1998; Hagerty et al., 1997; Mora, 1998). Actualmente, las señales del Arenal se clasifican en: tremores armónicos y espasmódicos, explosivas y de baja frecuencia.

El tremor del Arenal tiene generalmente una frecuencia fundamental ubicada en 0,9 Hz y puede llegar a tener hasta 10 armónicos regularmente espaciados (e.g., Hagerty et al., 2000), sin embargo autores como Alvarado et al., (1997), McNutt (1997), Soto et al., (1998), restringen la frecuencia del modo fundamental a 1,8-1,9 Hz. Mora (1998), restringe la frecuencia total del tremor entre los 0,8-10 Hz. Tanto la frecuencia fundamental como los armónicos pueden variar en función del tiempo manteniendo su espaciado regular (e.g., Hagerty et al., 2000; Benoit & McNutt, 1997; Mora, 1998). Las variaciones del tremor pueden durar desde segundos hasta varios minutos o bien pueden ser abruptas (Lessage et al., 2006).

Una señal explosiva (“*whoosh*” sensu Barboza & Melson, 1990) puede ser seguida por un tremor armónico de duración variable (“*chugs*”, sensu Barboza & Melson, 1990). Originalmente descritas por Barboza & Melson, (1990), fueron analizadas posteriormente por Benoit & McNutt (1997), Mora (2003) y Lessage et al., (2006). Según estos autores las señales explosivas (“soplidos”), presentan sonidos propios de una nave en propulsión (jet), representados por erupciones de larga duración (5-250 seg.) y frecuencias entre los 2-7 Hz. Los sonidos rítmicos (“*chugs*”) son una serie de pequeños eventos que recrean un sonido similar al que hace una locomotora, la señal registrada es armónica, y se relaciona con emisión de gas o pequeñas cantidades de tefra, y normalmente las emisiones de coladas (Melson, 1989). Su duración varía entre los 5 y 100 s, pero su mayor concentración de energía se da entre los 15 y 80 s, con frecuencias ubicadas entre los 2-6 Hz (Barboza & Melson, 1990). Posteriormente, Benoit & McNutt (1997), asocian los “*chugs*”, solamente a salida de gases, e infieren que la concentración de burbujas en el gas dentro del conducto es variable y también los cambios en función del tiempo, de ese modo cambia la velocidad acústica.

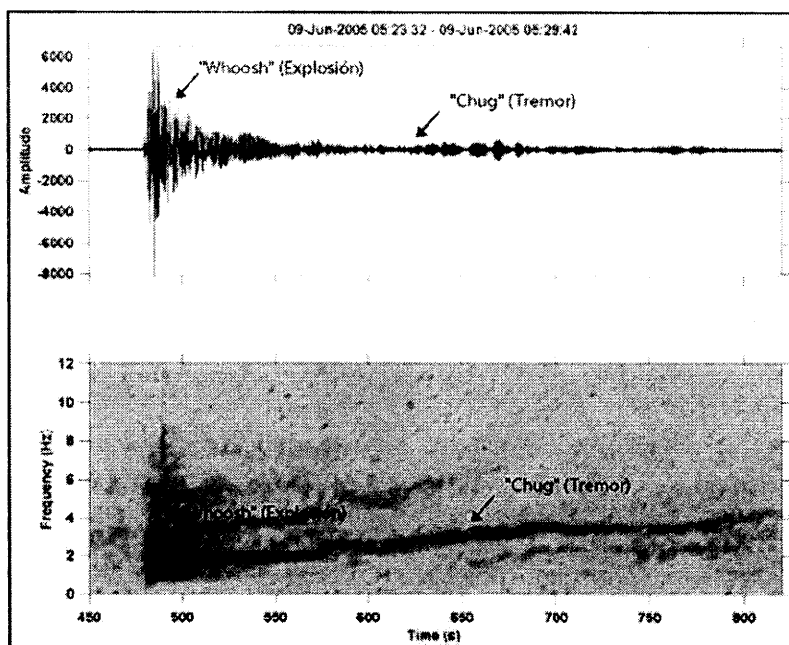


Figura 1. Definición de “whoosh” y “chug” sensu Barboza & Nelson, 1990

Varios modelos han sido desarrollados para explicar el tremor volcánico. En los estudios realizados por Chouet (1986, 1988), se propone el modelo de fracturas rellenas de fluidos, que explica el contenido espectral de la señal y lo relaciona con la dinámica de los fluidos presentes en un volcán. También Julián (1994), implementa un modelo basado en una excitación no lineal de las paredes del conducto magmático, producto del flujo de un fluido en un canal irregular. Por su parte Lessage et al., (2006), proponen un modelo basado en pulsos repetitivos de presión (liberados a partir de las fracturas de un tapón de lava, que se encuentra en la parte superior del conducto magmático), con períodos repetidos, estabilizados por un mecanismo de retroalimentación ligado a la resonancia del conducto. De igual modo, Sturton & Neuberg (2005), discuten las implicaciones para los eventos de baja frecuencia, de los efectos de la longitud del conducto y la velocidad acústica, sobre la resonancia del conducto.

El tremor volcánico se representa como la señal sísmica característica de la actividad volcánica, por lo cual se han realizado numerosos estudios y modelos, con el fin de determinar las características físicas y geometría de su fuente, sin que haya un consenso en el ámbito mundial sobre ello. El objetivo principal de esta investigación es realizar una descripción detallada de los “chugs” (“resoplidos” o sonidos rítmicos), con base a su frecuencia fundamental, variaciones de la misma, y sus relaciones temporales. En el presente trabajo no se realizó una modelización fuente, pues la base teórica es limitada y los datos son insuficientes.

### Datos y procesamiento

En 1974, la vigilancia del volcán Arenal deviene una labor fundamental para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) debido a la construcción de la presa hidroeléctrica a proximidad del volcán. Por ello se creó la Sección de Sismología y Vulcanología y luego el primer Observatorio Sismológico de Costa Rica en el Cerro Chiripa, Tilarán, hoy cede del OSIVAM (Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles).



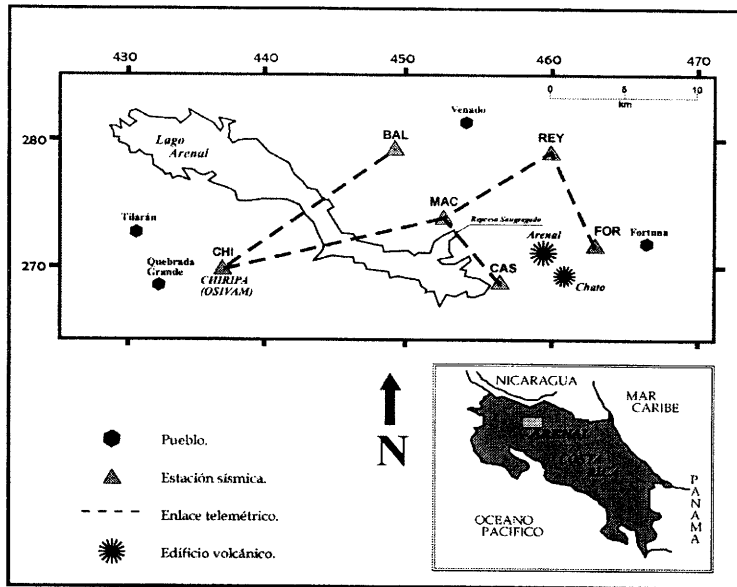


Figura 2. Red de estaciones sísmicas del volcán Arenal.

Los datos utilizados para esta investigación se obtuvieron de las estaciones sísmicas FOR, MAC y CAS, (Fig. 2) utilizando los dos tipos de registro: continuo y por disparo, que presentan una frecuencia de muestreo de 100 Hz/s. Las señales analizadas corresponden al período comprendido entre 1 de junio del 2004 y 1 de junio del 2005, y se escogieron de manera aleatoria, por lo no corresponden con la totalidad de las señales registradas para este período. En total se analizaron un conjunto de 30 señales, compuestas por una explosión (“whoosh”) con subsecuente tremor (“chug”) en su coda (Fig. 1). Uno de los aspectos fundamentales a estudiar en las señales sismo-volcánicas es el contenido espectral, es decir, la distribución de la energía en el dominio temporal y de frecuencias. Interesa específicamente las características de los picos espectrales: frecuencia, amplitud, forma, estabilidad y tiempo de llegada. Se trabajó con un análisis de T vrs F, esta información es posible obtenerla mediante técnicas de tratamiento de señal tales como los espectrogramas (Fourier móvil). El espectrograma realizado presenta una ventana móvil de 5,12 s y un traslape de 2,56 s.

## Resultados

Las señales analizadas corresponden con segmentos de tremor (“chugs”) originados en la coda de una explosión. El tremor observado en la coda de explosiones en general, conserva una frecuencia que se incrementa con respecto al tiempo. Las frecuencias iniciales de los eventos varían entre 0,974 y 3,188 Hz, mientras que el intervalo de frecuencia en el que este pierde la totalidad de su energía (frecuencia final) corresponde con valores entre los 1,46 y 4,03 Hz (Figs. 3 y 4).

La variación de la frecuencia, determinada por  $\Delta F$ , está restringida a valores que se ubican dentro el intervalo: -1,373 Hz- 2,39 Hz (Fig. 5). La duración del tremor presenta una variabilidad alta, donde es posible observar desde eventos pequeños de 41,82 s, hasta señales que sobrepasan los 25 minutos (Fig. 6).

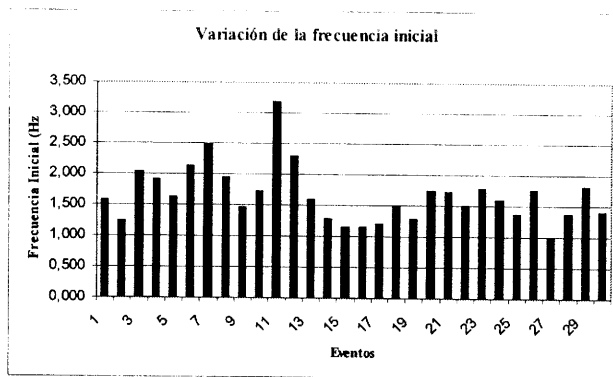


Figura 3. Variabilidad de la frecuencia inicial del tembor.

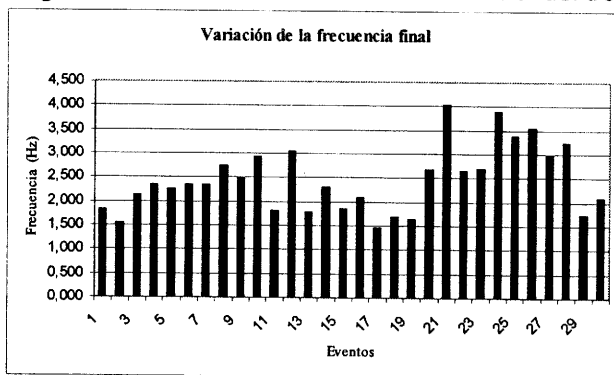


Figura 4. Variabilidad de la frecuencia final del tembor.

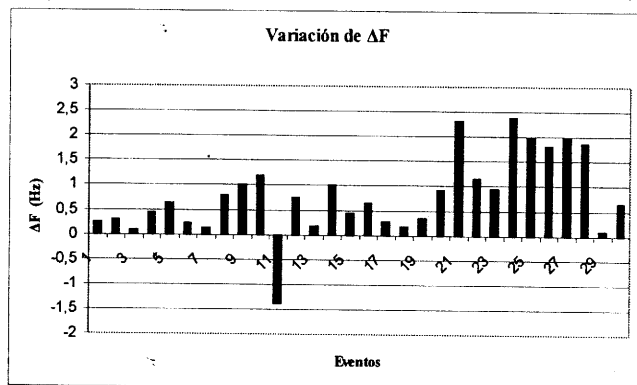


Figura 5. Variabilidad de ΔF durante el tembor.

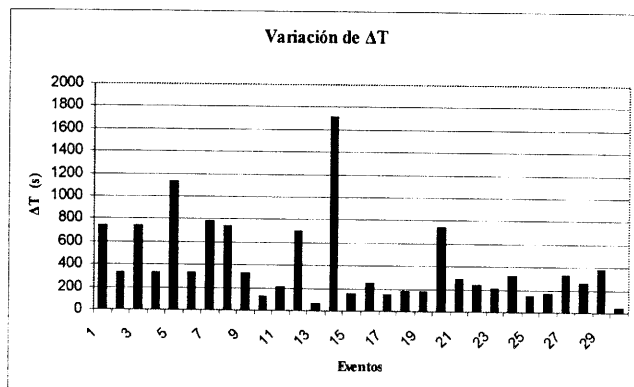
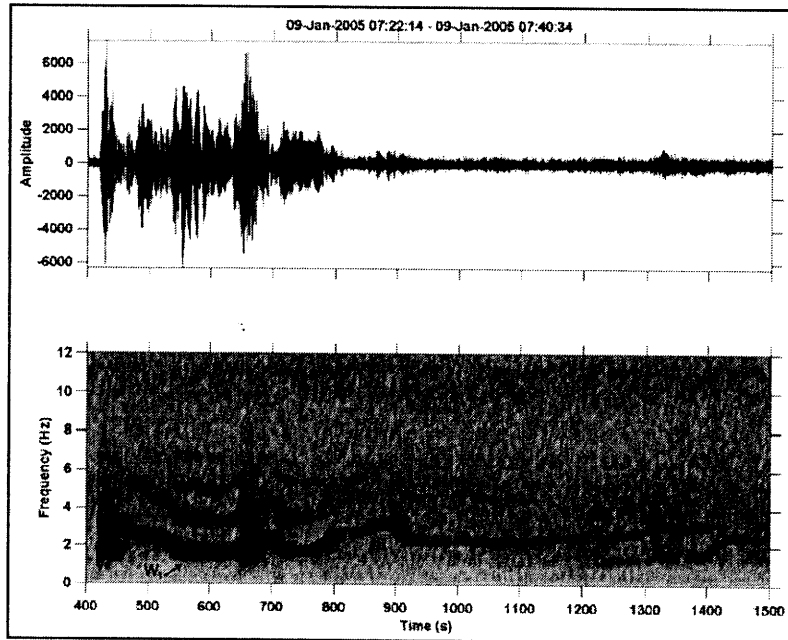


Figura 6. Variabilidad de ΔT durante el tembor.

Se pueden distinguir eventos con o sin armónicos. Los primeros (con armónicos) muestran una variabilidad estrecha en la frecuencia inicial del tremor, la cual se encuentra restringida a valores entre los 1,24 Hz y 2,48 Hz (siendo valores entre 1.50-2.0 Hz la frecuencia que más se repite). La frecuencia final varía entre los 1,55 y 2,92 Hz. El  $\Delta F$  máximo registrado tiene un valor de 1.20 Hz, el menor es de 0.13 Hz. En lo que respecta al  $\Delta T$  (duración de la señal), se observaron eventos que registran desde pocos segundos (59 s), hasta 15 min.

Las señales con sobretonos (armónicos) muestran una variabilidad mayor de la frecuencia inicial del modo fundamental del tremor, la cual está restringida a valores entre los 0,97 Hz y 3,20 Hz (frecuencias entre 1 y 2,5 Hz, son los valores más frecuentes), la frecuencia final se encuentra dentro del intervalo 1,46 - 4,02 Hz. El  $\Delta F$  del tremor presenta cambios dentro de los  $-1,37$  Hz, y 2,3 Hz. El  $\Delta T$  puede alcanzar hasta 1716,27 s (aprox. 25 min.), como máximo y como mínimo 41,83.



**Figura 7.** Tremor armónico con  $\Delta T= 1716,27$  s.

Todas las señales presentan un aumento de frecuencia conforme avanzan en el tiempo, excepto por un par de señales consecutivas registradas el 9 de enero del 2005. En el modo fundamental de  $W_1$ , se observa un ligero aumento de la frecuencia después de alcanzar un valor de 1,59 Hz, sin embargo, su frecuencia final es menor a la inicial (Fig. 7).

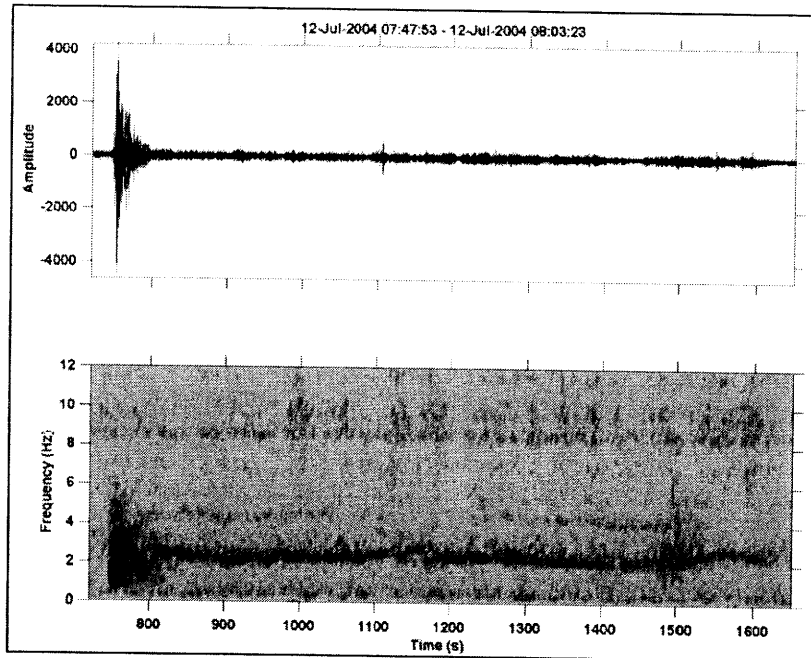


Figura 8. Tremor armónico con  $\Delta F < 0$ .

En general las bandas de frecuencia, varían de forma sinusoidal. Lo anterior se observa principalmente en los eventos de mayor duración (Figs. 7 y 8). Por el contrario los de menor duración tienen una banda espectral más estacionaria (Fig. 9). Esporádicamente se observan bandas de tremor no armónicas, que también presentan un aumento de frecuencia.

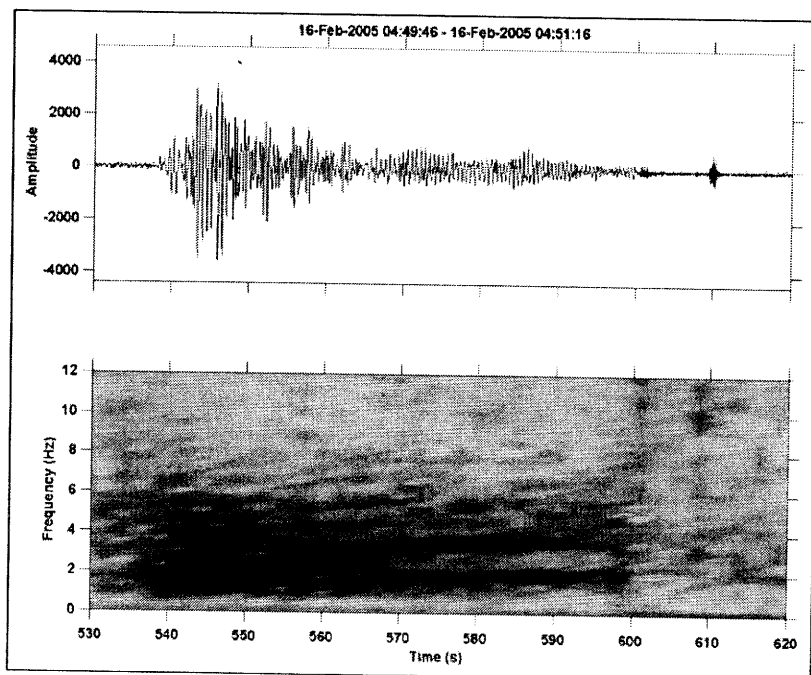


Figura 9. Tremor armónico con  $\Delta T = 41,83$  s.

Los “chugs” tipo tremor presentan 3 armónicos bien definidos como máximo, y en general solo se observa uno. Las frecuencias iniciales de los armónicos se ubican entre los 2,43-5,31 Hz y las finales entre los 2,6-5,18 Hz. El mayor cambio de frecuencias ( $\Delta F$ ) registrado tiene un valor de 2.39 Hz, el menor es de -1.46. La duración de los armónicos ( $\Delta T$ ) puede alcanzar hasta 581,23 s como máximo y como mínimo 22,21 s. También se pueden observar cambios de frecuencia abruptos, y por lo general tienden a perder energía mucho más rápidamente que las frecuencias fundamentales (Fig. 10).

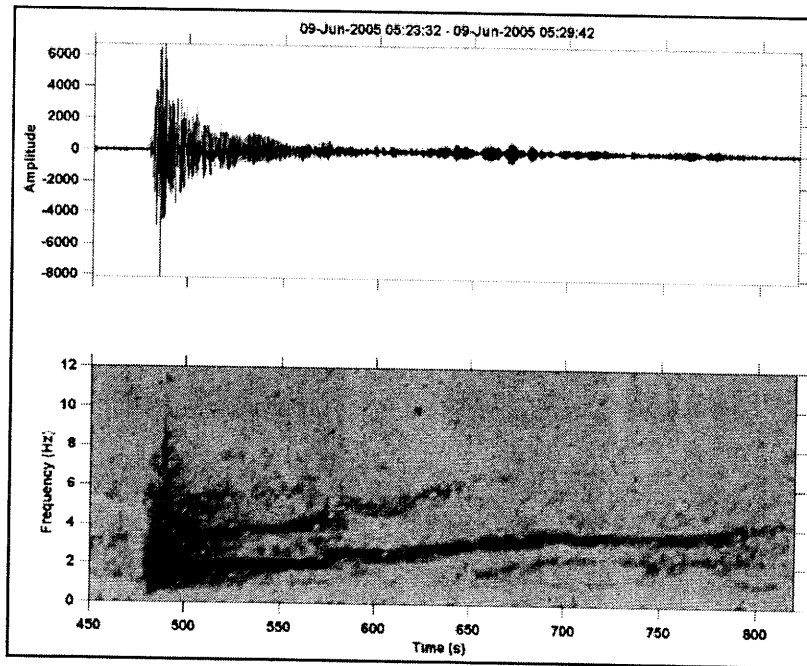


Figura 10. Tremor armónico de corta duración.

### Discusión

La tendencia general observada corresponde con un aumento de frecuencia conforme la señal avanza en el tiempo, lo cual es consecuente con los trabajos anteriores de Barboza & Melson (1990), Benoit & MacNutt (1997) y Lessage et al., (2006). Sin embargo, este último autor registra una señal con un  $\Delta F$  negativo. Esto representa un patrón anómalo para este tipo de eventos, y es también observado en este estudio.

Barboza & Melson (1990), registran frecuencias que varían desde los 2 a los 6 Hz, aunque en ese estudio no se detalla si la frecuencia medida corresponde al modo fundamental o también se incluyen las frecuencias de los armónicos. En cambio, Benoit & MacNutt (1997), registraron frecuencias que se encuentran entre los 1,9 y 3,2 Hz para el modo fundamental, con un cese abrupto del tremor cuando llega a 3,2-3,5 Hz. Lo anterior difiere ligeramente de lo observado en el presente trabajo, ya que, el modo fundamental del tremor puede sobrepasar los 4,00 Hz y además su frecuencia inicial reporta valores más bajos que los observados estos autores (0,97 Hz). Barboza & Melson (1990) reportan una duración del tremor que varía entre 5 y 100 s. El  $\Delta T$  de los “chugs”, en el presente estudio sobrepasa por mucho esta cifra (1716,45 s). También sobrepasa los 800 s, que fueron registrados por Benoit & MacNutt (1997). No se observa una correlación clara entre  $\Delta T$  y  $\Delta F$ .

Aunque no se cuantificó, es evidente que la explosión inicial o soplo (*"whoosh"*) tiene un mayor espectro de frecuencia, que el tremor en su coda (*"chug"*). Melson & Barboza (1990) restringen el contenido espectral del soplo entre 2 y 7 Hz. Esto pone en evidencia dos fases claras (sin separación temporal aparente) del conjunto *"whoosh"- "chug"*. Una de mayor frecuencia (que llega primero a la estación sísmica) y otra donde las frecuencias del modo fundamental del tremor (cuya llegada es posterior) son menores.

Sturton & Neuberg (2005), en su investigación sobre las señales LP, describen un contenido espectral similar, correspondiente con un resonador (cerrado en ambos extremos) pequeño (aprox. 200 m), donde la sección de baja frecuencia forma una coda monocromática. Sin embargo, la coda de tremor observada por estos autores presenta una evolución en el tiempo estacionaria, distinta al constante aumento observado en los *"chugs"* del Arenal.

### Conclusiones

Es indiscutible la variabilidad de frecuencia y duración que exhiben los *"chugs"* del volcán Arenal. A pesar de los estudios realizados por diversos autores es muy difícil restringir este tipo de señales a determinados intervalos de frecuencia y tiempo, así como también determinar su grado de estabilidad o saltos de frecuencia. La modelización de la fuente a partir de los datos obtenidos, no es posible de realizar, pues los mismos son insuficientes. Sin embargo, se considera esta información útil para un posterior desarrollo del modelo. Algunas inferencias sobre la fuente se pueden realizar considerando modelos preestablecidos:

- El aumento de frecuencia podría ser explicado con base en el modelo de "organ-pipe" ( $f = c/2L$ ), asumiendo una migración de la fuente hacia arriba, lo que implica un acortamiento del conducto (L). Esto para los casos donde asciende la frecuencia. Mientras que una migración de la fuente en profundidad podría tener el efecto contrario (disminución de frecuencia).
- Es posible, que este aumento de frecuencia también pueda ser generado por un aumento en la presión (menor exsolución de gases del magma), aumentando la velocidad acústica (c) de la onda que viaja por el fluido.
- Los cambios abruptos de frecuencia observados podrían ser explicados, mediante el modelo de Lessage et al., (2005), donde el tapón superior bien sellado, provoca un incremento de la presión y un cambio abrupto de frecuencia positiva se produce.

Es necesario complementar este trabajo con un estudio estadístico, a partir de un análisis sistemático de las señales, que pueda determinar (en principio) alguna evolución (o no) en el tiempo de estos eventos, además de variaciones de frecuencia, correlación entre  $\Delta T$  y  $\Delta F$  y ocurrencia de señales con  $\Delta F$  negativo. También sería importante correlacionar la actividad eruptiva y piroclástica del volcán con el registro de estas señales, y de esta forma determinar la posible existencia de eventos premonitorios, asociados o posteriores, que permitan tener un marco conceptual más amplio de la fuente. Finalmente, las relaciones entre la explosión (*"whoosh"*) y el tremor (*"chug"*) son todavía poco estudiadas. Sturton & Neuberg (2005) describen un comportamiento frecuencial parecido al conjunto *"whoosh"* y *"chug"*, sin embargo, la evolución estacionaria del tremor en el tiempo que estos autores describen, no es compatible con el aumento de frecuencia de las señales del Arenal.

### Agradecimientos

Mauricio Mora me orientó y ayudó en la elaboración del presente trabajo. Guillermo Alvarado y Luis Madrigal aportaron ayuda complementaria en su edición final.

### Referencias

Alvarado, G.E., Taylor, W., Ohrnberger, M., Soto, G. & Madrigal, L., 1997: First observations of volcanic seismicity at Arenal volcano (Costa Rica) using a new three component seismic data network. -*Bol. Obs. Vulc. Arenal*, 8 (15-16):11-45. San José.

Alvarado, G.E. & Soto, G.J., 2001: Pyroclastic flow generated by crater-wall collapse and outpouring of lava pool of Arenal Volcano, Costa Rica. -*Bull. Volcanol.*, (63):557-568.

Barboza, V. & Melson, W., 1990: Correlación entre las señales sísmicas y los sonidos de las erupciones del volcán Arenal. -*Boletín de Vulcanología*, (21):8-12. San José

Benoit, J.P. & Macnutt, S., 1997: New constraints on source processes of volcanic tremor at Arenal Volcano, Costa Rica, using broadband seismic data. -*Geophys. Res. letters*, (24):449-452.

Chouet, B., 1986: Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method. -*J. Geophys. Res.*, 91(B14)13 967-13 992.

Chouet, B., 1988: Resonance of fluid driven-crack: Radiation properties and implications for the source of long period events and harmonic tremor. -*J. Geophys. Res.*, 93(B5): 4375-4400.

Ferrazzini, V. & Aki, K., 1992: Preliminary results from field experiment on volcanic events. En: P., Gasparini, R., Scarpa, & K., Aki (eds.): *Volcanic seismology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Hagerty, M.T, Schwartz, S.Y., Garcés, M.A. & Protti, M., 2000: Analysis of seismic and acoustic observations at Arenal Volcano, Costa Rica, 1995-1997. -*J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 101:27-65.

Ibáñez, J., 1995: *Sismología Volcánica*. Curso internacional de sismología volcánica y geofísica volcánica. Consejo superior de investigaciones científicas, departamento de vulcanología, Museo Nacional de Ciencias Naturales. Madrid, España. Pág. 51.

Lessage, P., Mora, M., Alvarado, G.E., Pacheco, J. & Métaixian, J.P., 2006: Complex behavior and source model of tremor at Arenal volcano, Costa Rica. -*J. Volcanol. Geotherm. Res.*

Melson, W.G. & Sáenz, R., 1973: Volume, energy and ciclicity of eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica. -*Bull. Volcanol.*, 37(3): 416-437.

McNutt, S.R., 1992: Volcanic tremor. In: *Encyclopedia of Earth Science*, pp. 417-419. Academic Press, Inc.

Mora, M., 1998: Análisis espectral del tremor armónico del volcán Arenal (Costa Rica) y modelización de la fuente. -117 págs. Universidad de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

Mora, M., 2003: Etude de la structure superficielle et de l'activité sismique du volcan Arenal, Costa Rica. PhD. Thesis, Université de Savoie, France.

Melson, W., 1989: Las erupciones del volcán Arenal: 1 al 13 de abril de1989. -*Boletín de Vulcanología*, 20:15-22.

Sturton, S. & Neuberg, J., 2005 (in press): The effects of the conduit length and acoustic velocity on conduit resonance: Implications for low-frequency events. -*J. Volcanol. Geotherm. Res.*

Soto, G., Alvarado, G. & Ghigliotti, M., 1998a: El registro eruptivo del Arenal en el lapso 3000-7000 años antes del presente y nuevas deducciones sobre la edad del volcán. -Bol. Observ. Sismol. Arenal Miravalles 9 (17-18):19-49.

Soto, G.J., Taylor, W. & Naranjo, M., 1998b: Los registros de los tremores del volcán Arenal entre 1994 y 1997: su estadística y el comportamiento dinámico del volcán. -Boletín OSIVAM, 10 (19-20): 35-42, 1997. San José.



## La actividad sismotectónica durante el 2004 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles, ARCOSA y Tejona (Guanacaste)

[Seismotectonic activity in the surroundings of Miravalles, ARCOSA and Tejona electricity generation projects (Guanacaste), throughout the year 2004]

Waldo Taylor

Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica  
wtaylor@ice.go.cr

Taylor, W., 2006: La actividad sismotectónica durante el 2004 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles, ARCOSA y Tejona. -Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29): 48-60. San José.

### Resumen

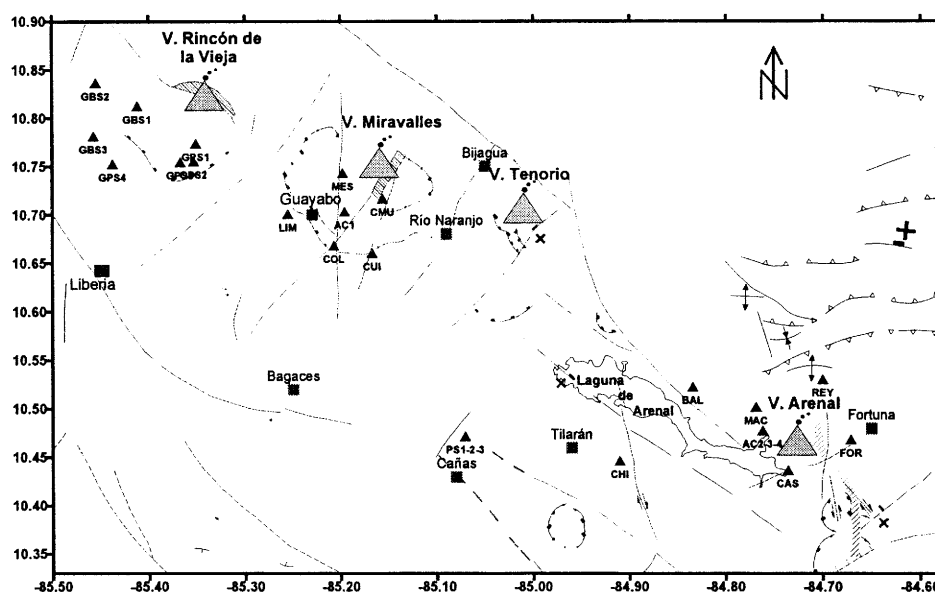
Durante el año 2004, se localizaron 192 sismos en la zona de interés que mantiene instrumentada el OSIVAM-ICE. La mayoría de ellos (79%) fueron corticales someros (profundidades inferiores a 25 km), mientras que el 21% restante por lo general están relacionados a la interacción entre las placas Coco y Caribe. La actividad sísmica local se distribuyó en tres zonas principales: a) en el Campo Geotérmico de Miravalles (CGM); b) cerca de Bijagua de Upala; y c) en el flanco sureste del volcán Tenorio, cerca de Tierras Morenas. La sismicidad en el CGM se distribuye, en superficie y profundidad, dentro de las zonas de producción e inyección (la mayoría con profundidades < 2,5 km). Los eventos sentidos por los habitantes de las poblaciones cercanas, se produjeron durante enero, julio y noviembre, especialmente el 9 de noviembre, cuando se produjo un sismo ( $M_L = 3,1$ ) que fue sentido (IMM= III) en los poblados de Guayabo y la Fortuna de Bagaces. La distribución de los sismos del periodo 1994-2004 indica que el reservorio geotérmico tiene un volumen aproximado de 80 km<sup>3</sup>. Desde el enjambre sísmico ocurrido en el año 2002, la zona sísmica de Bijagua de Upala ha mantenido una actividad moderada hasta el presente con sismos de magnitudes  $M_L < 2,0$  y profundidades entre 3 y 7 km. Por otro lado, la sismicidad en Tierras Morenas y alrededores (magnitudes  $M_L < 2,3$ ; profundidades entre 1 y 6 km) sugiere que la zona permanece activa. La actividad sísmica disminuyó en la Cordillera de Guanacaste durante el año 2004.

### Abstract

A total of 192 earthquakes was located by OSIVAM-ICE in its area of main interest in 2004. Most of them (79%) had crustal origin (less than 25 km depth); the remaining 21% are related with the interaction between Coco and Caribbean plates. Shallow seismicity was concentrated in three main areas: a) within the Miravalles Geothermal Field (MGF); b) near Bijagua of Upala; and c) southeast flank of Tenorio Volcano, near Tierras Morenas. The MGF seismicity distributions of the earthquakes are in surface and depth (the majority < 2,5 km depth) along the exploitation and injection areas. Felt earthquakes in nearby towns, occurred during January, July and November, especially at Nov, 9<sup>th</sup> when an earthquake ( $M_L = 3,1$ ) was felt in Guayabo and Fortuna de Bagaces (MMI= III). Seismicity distribution suggests that geothermal reservoir volume is near to 80 km<sup>3</sup>. Since the Bijagua de Upala seismic swarm occurred in 2002, the seismic area at Bijagua de Upala keep a moderate seismicity until today, yield  $M_L < 2,0$  magnitudes earthquakes with depths between 3 and 7 km. On the other hand, the seismicity in the surroundings of Tierras Morenas had earthquakes ( $M_L < 2,3$  magnitude, depths between 1 and 6 km), showing that the zone is active. Seismic activity decreased at Cordillera de Guanacaste during 2004.

## Introducción

La red sismológica está compuesta por 11 estaciones sismológicas: 5 estaciones en Miravalles (LIM, MES, CMU, CUI y COL), 4 estaciones alrededor del volcán Arenal (FOR, REY, MAC y CAS), una estación en el flanco norte de la Laguna de Arenal (BAL) y una estación en el flanco sur de la Laguna de Arenal (CHI); y 7 acelerógrafos: 1 estación en Miravalles (AC1), 3 estaciones en la presa de Sangregado (AC2, AC3 y AC4) y 3 estaciones en la presa de Sandillal (PS1, PS2 y PS3). Durante el 2004 las estaciones sismológicas BAL, AC1, FOR, MAC y REY estuvieron fuera de servicio durante el primer semestre del año por falta de repuestos o debido a que no tienen GPS (reloj) y al perder el tiempo, quedan fuera de servicio. Durante el segundo semestre se instalaron estaciones sismológicas en estos lugares (excepto BAL) y además se inició la operación de 7 estaciones sismológicas en la red ubicada en el sector de Borinquen (estaciones GBS1, GBS2 y GBS) y Las Pailas (estaciones GPS1, GPS2, GPS3 y GPS4), en las cercanías del volcán Rincón de la Vieja. La figura 1 muestra la localización de las estaciones del OSIVAM y el mapa tectónico local del área.



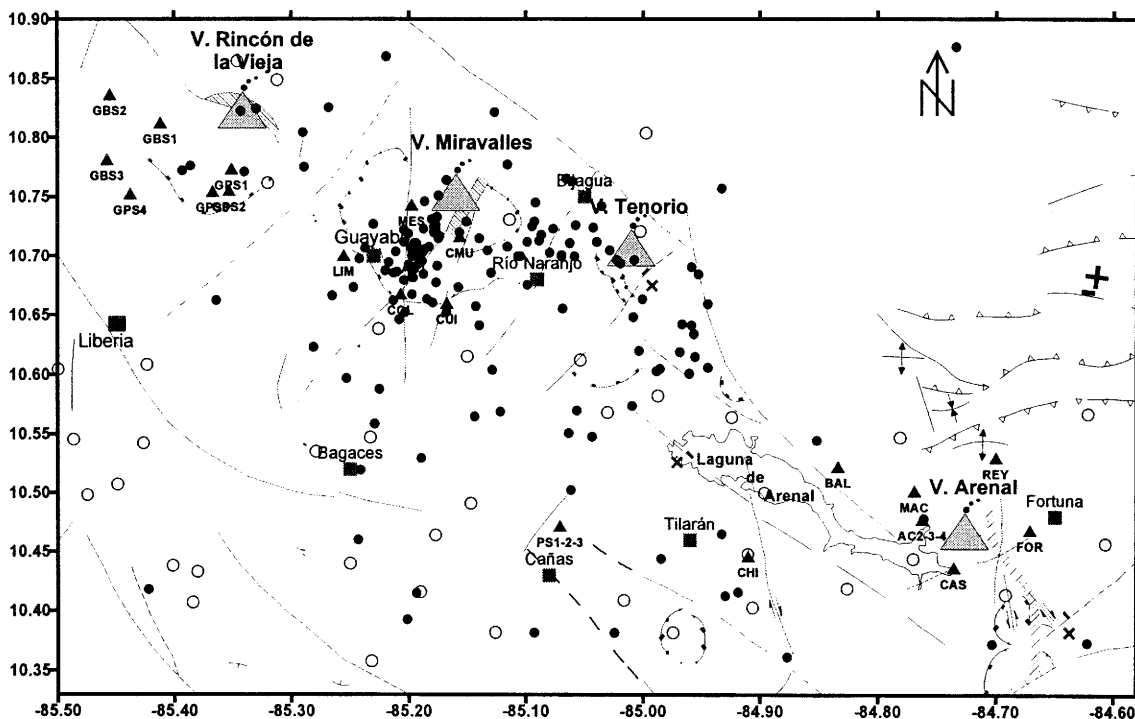
**Figura 1.** Localización de las estaciones sismológicas y acelerométricas del OSIVAM (triángulos negros). Los cuadrados son pequeñas poblaciones, las líneas rectas (continuos y/o discontinuas) representan las fallas más importantes en la región, las líneas con triángulos son fallas inversas, las líneas con flechas son pliegues, las líneas anchas a rayas son fallas inferidas y las líneas curvas con cuadrados son bordes de caldera (modificado de Denyer et al., 2003).

## Actividad sísmica

Durante este 2004 las estaciones sismológicas del OSIVAM registraron 1629 sismos, de los cuales 1325 son regionales (distancias epicentrales mayores a 80 km y profundidades mayores a 25 km) y 304 son sismos locales (distancias epicentrales menores a 80 km y profundidades menores a 25 km). Del total de eventos registrados se localizaron 938. La tabla 1 muestra del detalle de sismos registrados y localizados por mes. La ubicación de los sismos locales y regionales en los alrededores del PGM, ARCOSA y TEJONA pueden ser observadas en la figura 2.

**Tabla 1.** Número de sismos registrados mensualmente durante el año 2004.

Mes	Sismos Regionales	Sismos locales	Eventos localizados	Eventos cercanos al PGP, PGM, ARCOSA y Tejona
Enero	44	25	40	21
Febrero	59	6	35	11
Marzo	36	9	18	4
Abril	118	29	78	16
Mayo	135	19	76	17
Junio	146	36	96	19
Julio	108	47	87	27
Agosto	121	31	109	15
Setiembre	108	39	86	20
Octubre	138	23	88	19
Noviembre	207	18	136	10
Diciembre	105	22	89	13
<b>Total</b>	<b>1325</b>	<b>304</b>	<b>938</b>	<b>192</b>



**Figura 2.** Sismos locales (puntos de color negro) localizados en los alrededores del PGM, ARCOSA y Tejona durante el año 2004. Los círculos blancos muestran la localización de los sismos con más de 25 km de profundidad (sismos regionales). La simbología es la misma que en la figura anterior.

En total fue posible localizar 152 eventos sísmicos en esa área con profundidades máximas de 25 km (79%) y magnitudes locales ( $M_L$ ) generalmente inferiores a los 3,3 grados, ubicados por debajo de la cordillera volcánica y principalmente en los sectores del CGM y entre la zona de Bijagua y Río Naranjo. Por su parte, 40 sismos con profundidades superiores a 25 km (21%) y  $M_L$  entre 2 los 3 grados, se localizan sin ningún patrón definido (por debajo de la cordillera volcánica y al suroeste del área estudiada) y

asociados al proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe. El noreste presenta una actividad sísmica muy baja, y claramente se aprecia que las fallas con rumbo NO-SE marcan un límite importante en la distribución sísmica y los procesos tectónicos.

### Sismicidad en los alrededores y dentro del Campo Geotérmico de Miravalles

Al este de Miravalles, desde el año 2001 y especialmente después del enjambre de Bijagua de Upala y Río Naranjo del año 2002, la actividad sísmica en ese sector se ha mantenido con sismos de baja magnitud ( $M_L < 2,0$ ) y profundidades entre 3 y 7 km, lo que indica que la zona continua activa y con capacidad de generar un sismo de mayor magnitud en el futuro.

Dentro de lo que son propiamente los límites del campo geotérmico (aproximadamente un área de  $90 \text{ km}^2$ ), varios sismos fueron sentidos levemente (IMM III) en los meses de enero, mayo, julio y noviembre y, en total, se han localizado 52 eventos con profundidades que entre 1,0 y 10,7 km (43 microsismos tienen profundidades inferiores a 3,0 km), normalmente con magnitudes  $M_L < 2,8$  grados, con excepción del sismo del 9 de noviembre que tuvo una magnitud de 3,2 grados y una profundidad de 9,1 km. La tabla 2 muestra que, con excepción del enjambre sísmico ocurrido al este y sureste de Cabro Muco en octubre del año 1997, el número de sismos localizados dentro del PGM venía en aumento desde el año 2000, cuando se localizaron 11 sismos, 36 sismos en el 2001, 52 sismos en el 2002 y 78 sismos en el 2003. Este año, sin embargo, la sismicidad bajo 33% con respecto al año anterior y alcanzó un nivel similar al que presentaba en el 2002 (Barquero, 2001; Taylor, 2002, 2003 y 2004).

**Tabla 2.** Sismos localizados en los alrededores del PGM ( $90 \text{ km}^2$ ), periodo 1995-2004. Prof. < 15 km.

Año	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Sismos totales	3	4	22 <sup>1</sup>	1	2	11	36	52	78	52

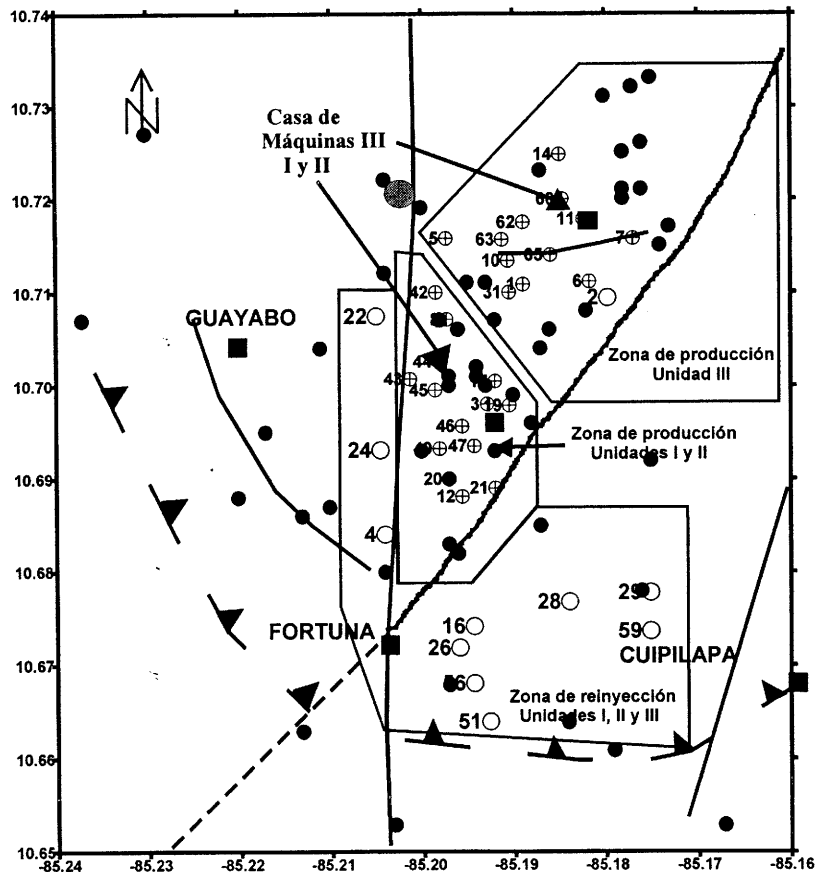
\*La red estuvo fuera de operación de julio de 1995 a mayo de 1996.

<sup>1</sup>Ocurrió un enjambre sísmico al este y sureste de Cabro Muco.

La tabla 3 muestra la cantidad de sismos localizados mensualmente para el año 2004. En años anteriores, se presentó una concentración de sismos hacia el noreste del campo geotérmico (Zona de producción Unidad III), y una segunda agrupación en el centro del campo, donde se concentra la zona de producción de las Unidades I y II. Para este año hay una distribución uniforme a lo largo del área de producción (Fig. 3). La zona de reinyección hasta la fecha ha presentado poca actividad sísmica.

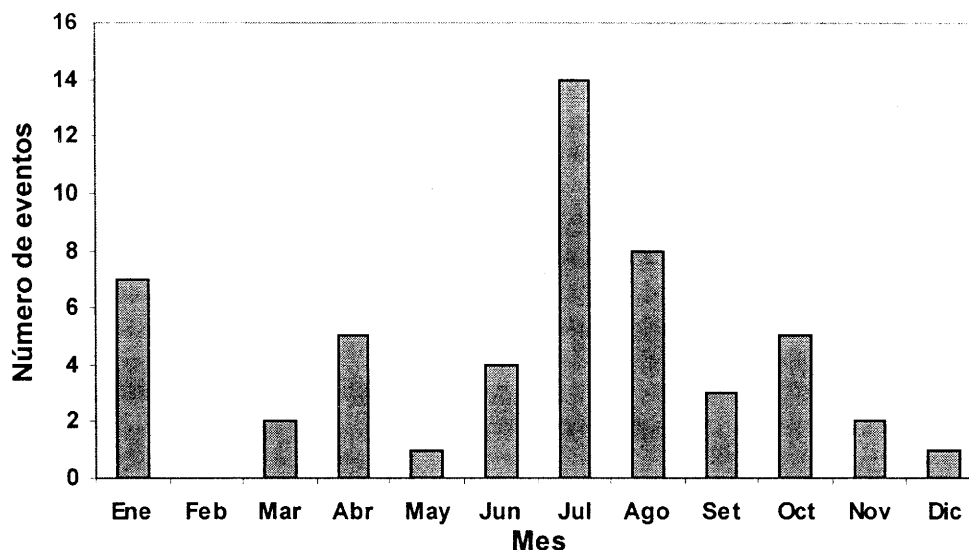
**Tabla 3.** Sismos localizados mensualmente durante el año 2004 en el PGM (90 km<sup>2</sup>).

Mes	Eventos locales cercanos al PGM
Enero	7
Febrero	0
Marzo	2
Abril	5
Mayo	1
Junio	4
Julio	14
Agosto	8
Setiembre	3
Octubre	5
Noviembre	2
Diciembre	1
<b>Total</b>	<b>52</b>



**Figura 3.** Localización de los microtemblores (círculos negros) dentro de los límites del campo geotérmico durante el año 2004. Los círculos blancos son los pozos inyectores, los círculos con una cruz son los pozos productores. Se indica la localización del sismo del 9 de noviembre (círculo gris,  $M_L=3,2$ ).

La distribución de los sismos dentro del campo (Fig. 3) es muy similar a la de los últimos dos años, es decir estos se localizan prácticamente dentro de las fallas N-S y NE-SO. Por otro lado, y al igual que lo ocurrido en los años anteriores, los enjambres sísmicos se registran en cortos intervalos de tiempo, por lo general se producen en cuestión de pocos minutos (30 minutos o menos).

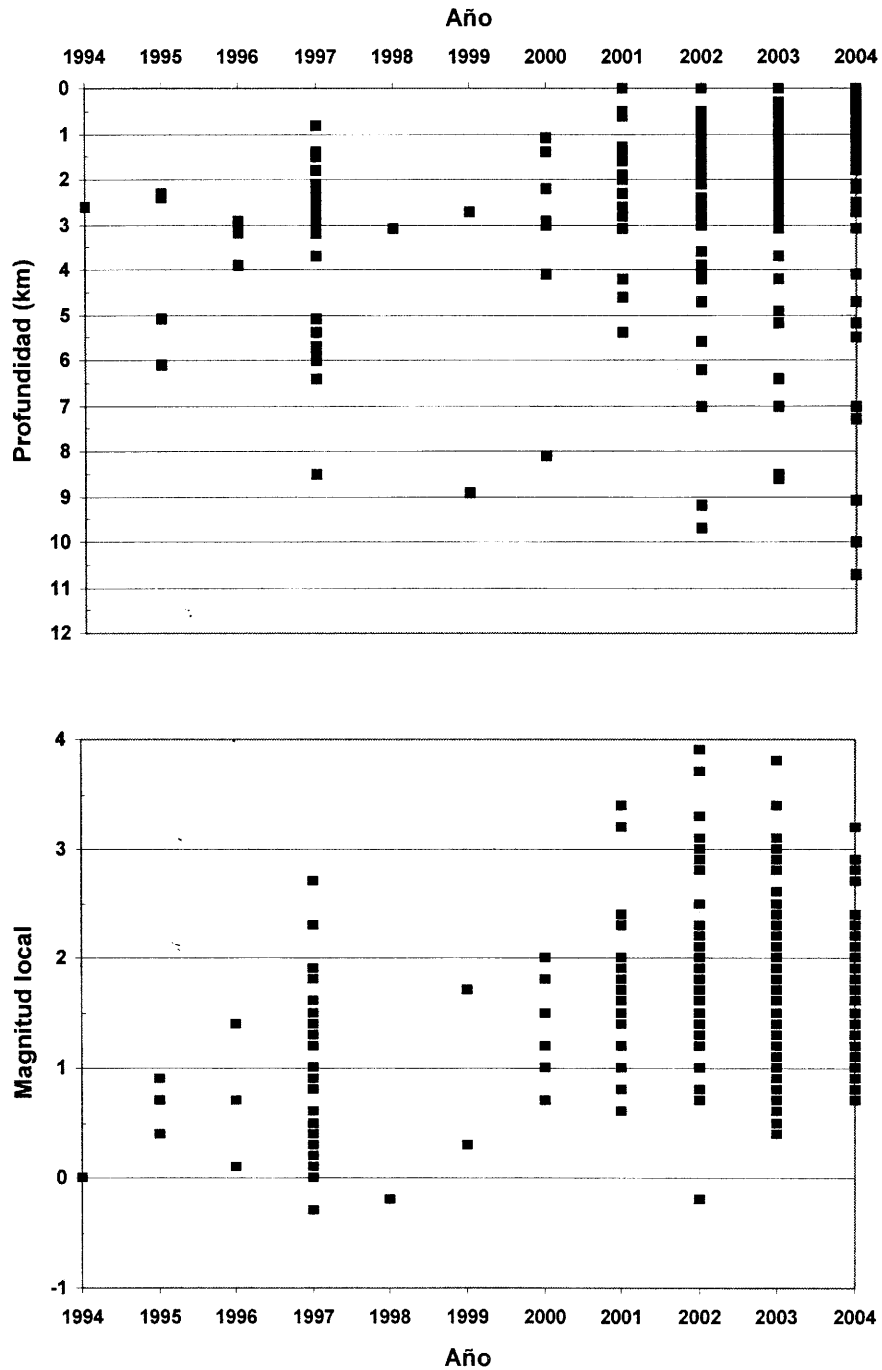


**Figura 4.** Número de micro sismos registrados mensualmente en el CGM durante el año 2004. La mayor cantidad de eventos en un mismo día ocurrió el 28 de julio.

Algunos de los eventos sentidos durante este año por los habitantes de las poblaciones cercanas, se produjeron durante enero, abril, julio y noviembre, especialmente el 9 de noviembre a las 10:30 a.m. cuando se produjo un sismo que alcanzó una magnitud  $M_L$  3,2 y fue sentido en los poblados de Guayabo y la Fortuna de Bagaces con una intensidad de III en la escala Mercalli modificada (IMM). Aunque la sismicidad del campo geotérmico continua siendo muy baja, estos grupos de sismos en cortos intervalos de tiempo son una característica que no se presentaba anteriormente al año 2001. Lo anterior podría significar que, si bien es cierto que hasta la fecha los efectos de la producción explotación son mínimos, éstos pudiesen estar indicando el inicio de una pequeña sismicidad inducida a lo largo de las zonas de fallas de rumbos N-S y NE-NO. Normalmente, el efecto térmico que ejerce el agua reinyectada y la explotación misma del yacimiento, afectan la presión de poro del medio fracturado, lo cual genera un cambio volumétrico del sistema que conlleva a desestabilizar el campo de esfuerzos prevaleciente por cortos intervalos de tiempos, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio. Este aumento de la sismicidad en el PGM, parece estar asociado con un incremento en el número de sismos locales de la cordillera volcánica, por lo que es difícil cuantificar que tanto ha aumentado la sismicidad debido a la explotación (ver conclusiones).

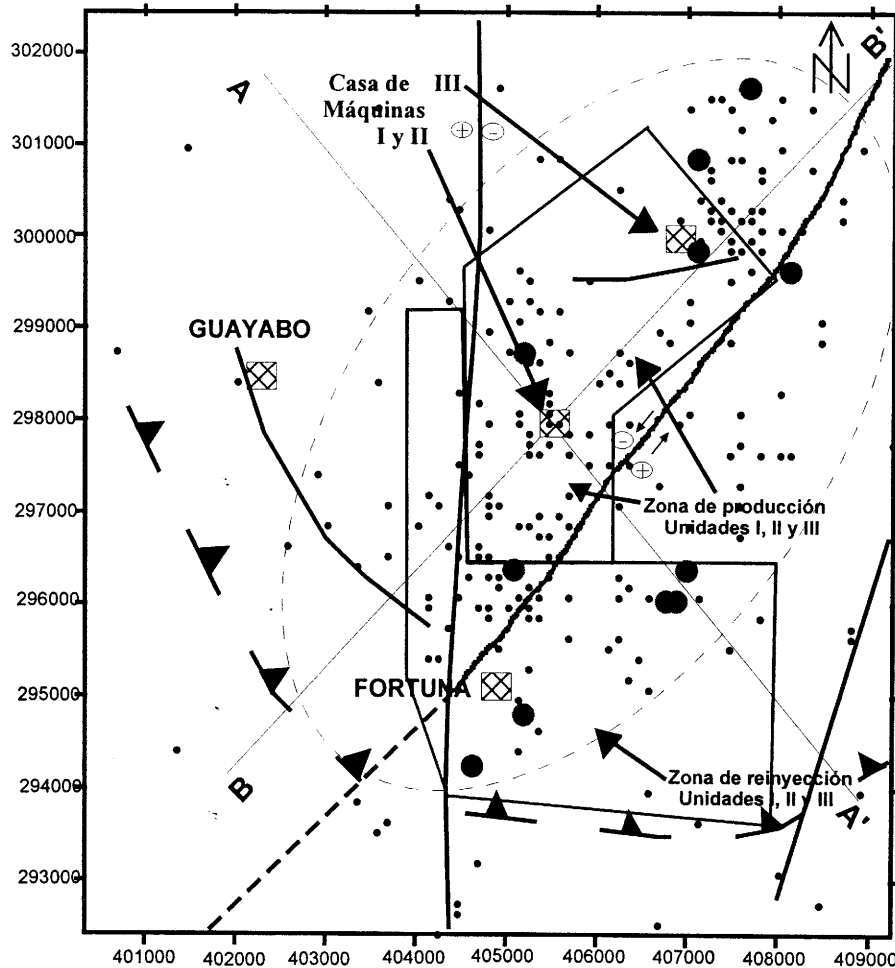
El observar la sismicidad anual no nos ayuda a tener un panorama completo, por lo que siempre es importante tener una idea general del comportamiento a través de tiempo más prolongado. La figura 5 muestra la distribución de magnitudes y profundidades de los sismos (profundidades menores a 10 km) registrados en el CGM durante el periodo 1994-2004. La línea de tendencia en el gráfico de la magnitud sugiere que esta ha aumentado paulatinamente, mientras que en el gráfico de profundidad se aprecia como la mayoría de eventos se localizaban entre 1 y 3 km de profundidad (especialmente al centro del Campo) antes del año 2001; algunos pocos superan los 6 km de profundidad. A partir de ese año, el rango de profundidad ha aumentado, es decir, hay sismos más someros y prueba de ello es la aparición de ondas superficiales en sismos locales que demuestran la generación de sismos a poca profundidad (Taylor, 2004). Sin embargo, también hay sismos de mayor profundidad, muy posiblemente debido a que el agua inyectada está alcanzando las capas inferiores. Similar comportamiento se ha observado en una prueba de inyección realizada en el Campo Geotérmico Hellisheidi

(Islandia) en julio y agosto del año 2003 (Bjornsson, 2004). Si se considera que en muchos casos la sismicidad se concentra en las partes superiores e inferiores del reservorio (Segall, 1989), el gráfico de la profundidad muestra (especialmente para el período 2000-2004), una capa entre los 3 y 4 km de profundidad que podría indicar la presencia de una capa productora a esa profundidad, con un espesor que varía entre los 0,5 y 1,0 km.



**Figura 5.** Magnitud y profundidad de los sismos registrados anualmente en el CGM durante el período 1994-2004.

Los mecanismos focales compuestos analizados, sugieren que en el sur y el noreste del CGM se producen movimientos de desplazamiento de rumbo lateral izquierdo con componente normal (Taylor, 2000), mientras que en el centro del campo, a profundidades menores de 1,8 km de profundidad, se producen fallamientos inversos con componente lateral izquierda, como el sismo de  $M_L$  3,8, registrado en setiembre del 2003. A mayores profundidades y cerca de la falla N-S el fallamiento son de tipo normal. La figura 6 muestra la localización epicentral de los sismos para el periodo 1994-2004, mientras que en la figura 7 se observa la localización hipocentral en perfiles de rumbo NE-SO y NO-SE.

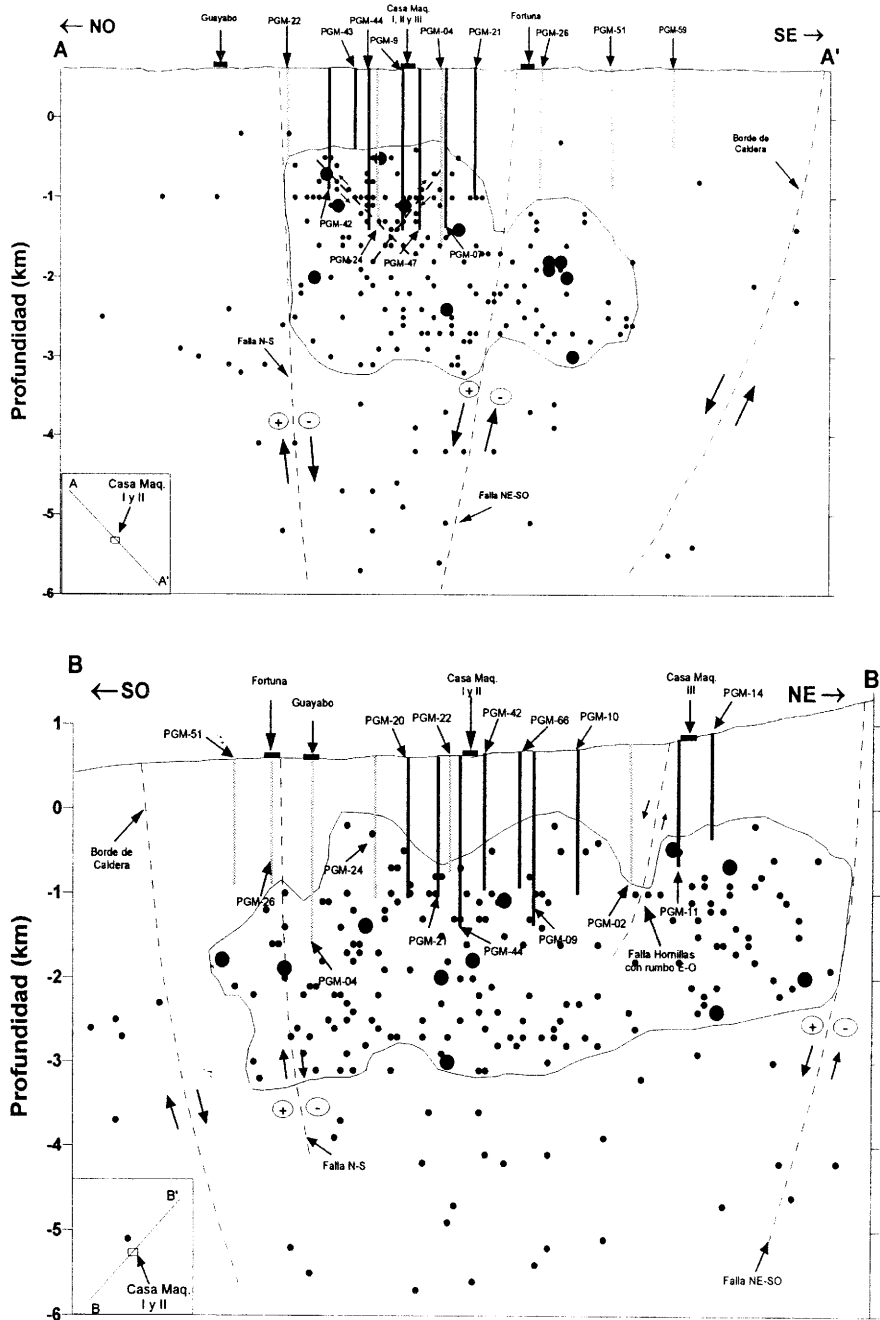


**Figura 6.** Localización epicentral de los sismos registrados en el PGM durante el período 1994-2004. El área dentro del ovalo delimitado por líneas a trazos, representa la extensión del reservorio geotérmico en superficie. Se indica la localización de los de los sismos con  $M_L \geq 3$  (puntos negros de mayor diámetro), así como los perfiles mostrados en la figura 8, el borde de caldera (líneas con triángulos), las fallas de rumbo NE-SO, la falla normal N-S y las zonas de inyección y producción (áreas delimitadas por los polígonos).

La distribución de los sismos y la deformación observada en el CGM, sugieren que la sismicidad está restringida dentro de la caldera, donde la mayoría de los sismos se concentran entre 1 y 3 km de profundidad, específicamente dentro del área delimitada por la falla con rumbo N-S y el borde de caldera al sur y al sureste. Por su parte, la falla NE-SO presenta sismicidad a ambos lados, incluso a profundidades de 6 km (Fig. 7, perfil A-



A'), evidencia clara que en sus límites se producen movimientos y, muy posiblemente, circulación de fluidos hidrotermales a lo largo de la misma (figura 7, perfil B-B').

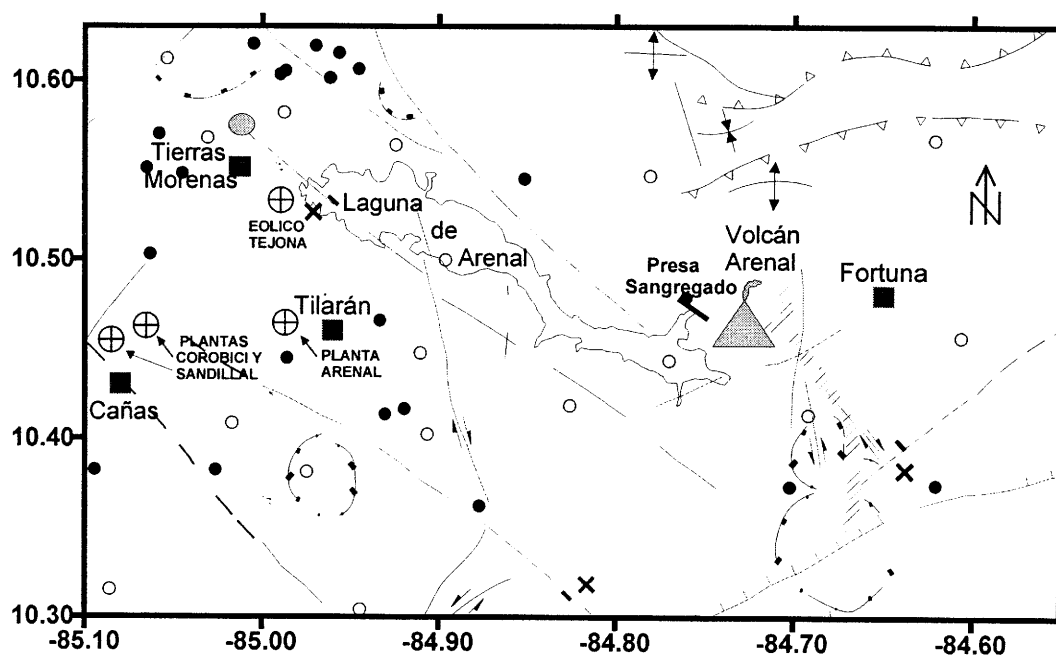


**Figura 7.** Perfiles donde se aprecia la distribución de los sismos y el modelo tectónico. Los puntos negros de mayor diámetro son sismos con  $M_L \geq 3$ . El fallamiento sinistral con componente normal se produce en los bordes de caldera y en las fallas N-S y NE-SO, mientras que los sismos someros ( $< 1,8$  km) en el centro del campo, sugieren fallamiento inverso con componente sinistral. Las líneas grises y negras son los pozos reinyectores y productores, respectivamente, mientras que las discontinuas son fallas y bordes de caldera. La mayor concentración de sismos sugiere la posible extensión del reservorio.

En la zona de inyección al sur y sureste CGM, no hay mucha sismicidad en los primeros 1,5 km de profundidad. La distribución observada en ambos perfiles, sugiere que los sismos al NE-NO tienen menor profundidad, y hacia el SE y SO la profundidad aumenta. Como es claro que los sismos se están produciendo dentro del reservorio y en los límites inferior y superior del mismo, es evidente que tiene un volumen máximo de  $80 \text{ km}^3$  (2 km de espesor, 5 km de ancho y 8 km de longitud). Los límites y la distribución del reservorio se muestran en los perfiles de la figura 7 y sugiere en términos generales, que la falla N-S es el límite oeste del mismo.

### Sismicidad en los alrededores de los proyectos Arenal, Corobicí, Sandillal (ARCOSA) y Tejona.

En el año 2004 se registraron y localizaron un total de 40 eventos sísmicos (figura 8), de los cuales 23 son someros o locales (profundidad  $< 25 \text{ km}$ ), son producidos por fallamiento local, y tienen magnitudes  $M_L < 2,5$  grados. El sismo local de mayor magnitud ( $M_L 2,5$ ) se registró el 13 de octubre a las 11:09 a.m., sentido levemente en Tierras Morenas.



**Figura 8.** Localización de los eventos someros (puntos negros) con menos de 25 km de profundidad y sismos profundos (círculos abiertos) en los alrededores de ARCOSA y Tejona para el año 2004. El sismo somero de magnitud más alta ( $M_L 2,5$ ) se indica con color gris.

La tabla 4 muestra el total de sismos localizados anualmente para el periodo 1994-2004, dentro de la misma área mostrada en la figura 8. Claramente se aprecia como el año 2003 presentó actividad sísmica superior a los enjambres sísmicos de los años 1997 y 1998, y es claro como la actividad se ha mantenido en niveles moderados desde el 1997, y especialmente como aumentó entre los años 2001 y 2003. Sin embargo, en este año 2004 se muestra una clara disminución de la cantidad de sismos localizados.

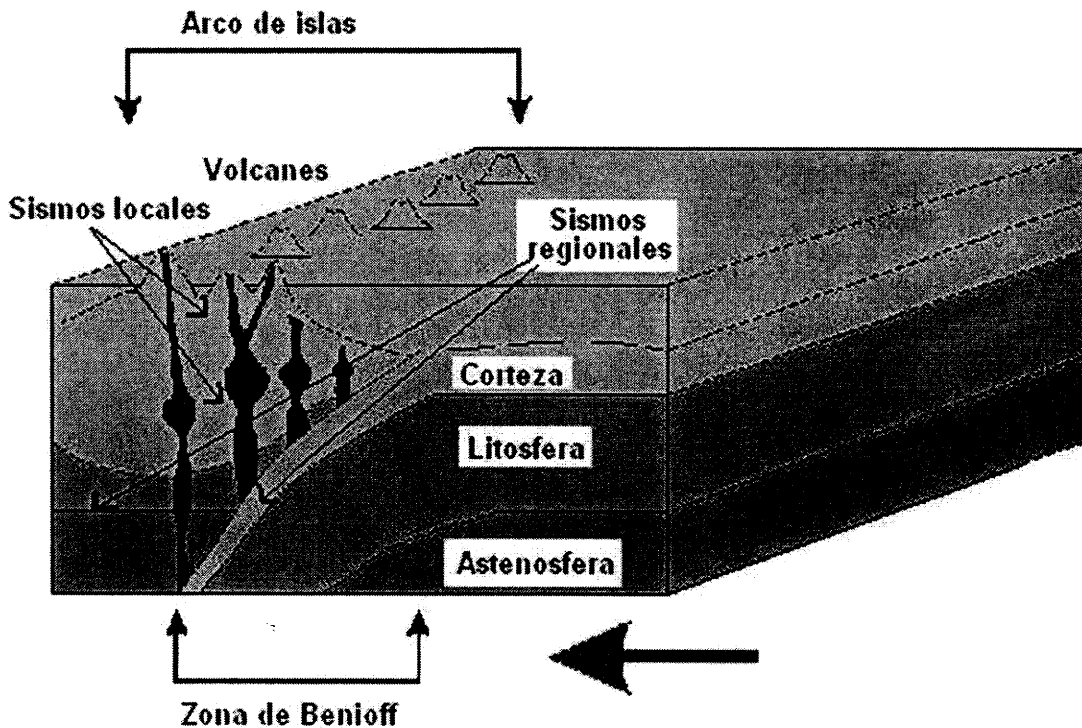
**Tabla 4.** Sismos (someros y profundos) localizados en los alrededores de los proyectos ARCOSA y Tejona para los años del periodo 1994-2004. Profundidades < 25 km.

Año	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Sismos totales	4	5	11	77 <sup>1</sup>	89 <sup>1</sup>	14	22	56	65	113	40

\*La red estuvo fuera de operación de julio de 1995 a mayo de 1996.

<sup>1</sup>Enjambre sísmico en los alrededores de Tierras Morenas.

Los sismos regionales se localizaron mayormente y como es de esperar, en el sector sureste con profundidades que varía entre los 26 y 203 km y magnitudes locales entre 3,2 y 2,0 grados. Esta actividad sísmica está asociada al proceso de subducción y a la interacción de las placas Coco y Caribe. En la figura 9 se muestra un esquema de interacción de placas, donde puede apreciarse como la sismicidad estaría asociada al fallamiento y la actividad volcánica del arco de islas, mientras que los sismos regionales son producto de la interacción de las placas y sismos profundos dentro de la placa. Esta zona donde se producen los sismos es conocida como Zona de Benioff.



**Figura 9.** Esquema de la Zona de Benioff donde se indican las zonas donde se producen los sismos locales y los sismos regionales (interacción de placas y sismos profundos).

En los últimos años se produjeron enjambres sísmicos en la región comprendida entre Tierras Morenas y Cañas, en una franja con dirección NE-SO. Durante este año, esta zona continuó su actividad sísmica, aunque en menor proporción comparada con los años anteriores, especialmente en el flanco sureste del volcán Tenorio. Hay una concentración de sismos donde se produjo el sismo del 21 de setiembre ( $M_L$  3,8). Con esta situación, es claro que ese sector es activo y de especial atención para los intereses del ICE, pues es un fuerte candidato a producir sismos de regular magnitud ( $M_L \leq 5,0$ ).

### Conclusiones

En el área de PGM la actividad sísmica disminuyó en comparación con el año 2003 pero muy similar a la del año 2002, distribuyéndose uniformemente a lo largo del área delimitada por las fallas N-S y NE-SO (zona de producción). Durante el mes de julio, y al igual que los tres años anteriores, se produjeron una secuencia de sismos en pocos minutos. La tendencia general de la profundidad y la magnitud indica que el tamaño de la magnitud de los sismos se está incrementando y que el rango de profundidades ha aumentado, es decir, a partir del año 2000 se han producido mayor cantidad de sismos someros, pero también ha aumentado la cantidad de sismos más profundos (> 3 km). Esto es un indicador de que los movimientos de fluidos han provocado pequeñas series de sismos, y muy probablemente están asociados con rupturas a lo largo de zonas de falla. Algunos investigadores sugieren que un aumento en la cantidad de sismos por debajo del reservorio es un indicador de que la inyección ha alcanzado capas inferiores. Aunque la sismicidad del PGM ha sido baja, es claro que ha aumentado a partir del año 2000, con un evento importante de  $M_L$  3,8 grados ocurrido en el mes de setiembre del año 2003. La distribución de la sismicidad sugiere que el CGM tiene un reservorio con un volumen máximo de  $80 \text{ km}^3$  (2 km de espesor, 5 km de ancho y 8 km de longitud).

El área cercana a Río Naranjo y Bijagua de Upala se ha mantenido con actividad sísmica constante desde el enjambre de enero - marzo del 2002, y no se descarta la ocurrencia de un sismo de mayor magnitud. Por su parte, la sismicidad en los alrededores de ARCOSA, se ha mantenido con una actividad moderada en los últimos años (desde 1997), y el sector al norte de Tierras Morenas presenta actividad sísmica importante, asociada a los sistemas de fallas normales.

La figura 10 muestra la evolución y la comparación de la sismicidad en el PGM y ARCOSA en los últimos ocho años. Después de los enjambres sísmicos de 1997 y 1998, claramente se aprecia la tendencia al aumento paulatino de la sismicidad base hasta el año 2003. La ocurrencia de enjambres sísmicos especialmente desde en los últimos dos años (Bijagua de Upala, Guachipelín - Pailas y Tierras Morenas) es evidencia clara de ello. Lo anterior sugiere que el incremento o disminución de la sismicidad local en el PGM no se debe en su totalidad a la explotación del campo geotérmico, aunque es muy probable, que esta contribuya a la generación de sismos en las fallas activas que se localizan dentro del campo, sino que en términos generales, sigue la tendencia normal del comportamiento de la sismicidad de la Cordillera de Guanacaste.

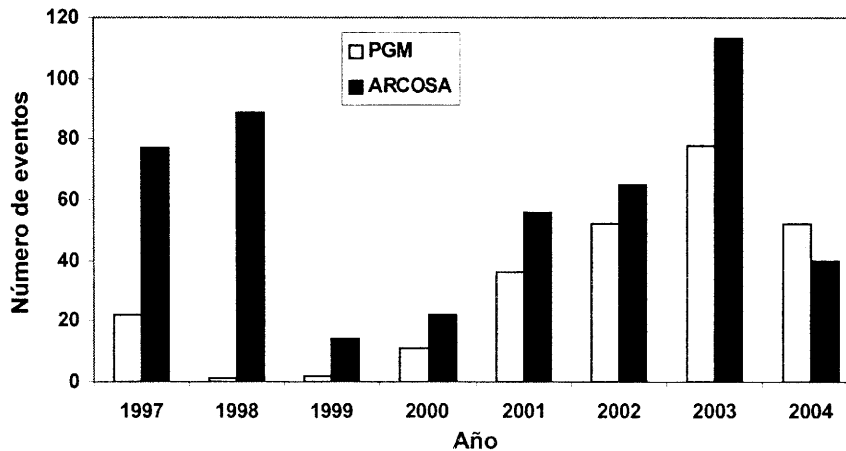


Figura 10. Comparación de la sismicidad base local en los proyectos de generación eléctrica ARCOSA y PGM en los últimos años.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a Guillermo E. Alvarado por la revisión de este trabajo. Y a los técnicos Marco T. Naranjo, Francisco Arias, Dagoberto Boniche y Luis Madrigal por la recolección de la información.

### **Referencias**

Barquero, R., 2001: Resumen de la actividad sísmica en las zonas de Miravalles y Arenal durante el año de 2000. -Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 7-14, San José.

Barquero, R., 2001: Resumen de la actividad sísmica en las zonas de Miravalles y Arenal durante el año de 1999. -Boletín OSIVAM, 12 (23-24): 1-6, San José.

Bjornsson, G., 2004: Reservoir conditions at 3-6 km depth in the Hellisheidi Geothermal field, SW-Island, estimated by deep drilling, cold water injection and seismic monitoring. -Proceedings, twenty-ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, January 26-28, 2004: 67-74, California.

Denyer, P., Montero, W. & Alvarado, G.E., 2003: Atlas Tectónico de Costa Rica. -Editorial de la Universidad de Costa Rica. 81 pp.

Segall, P., 1989: Earthquakes triggered by fluid extraction. *Geology*, October, 942-946.

Taylor, W., 2002: La actividad sismotectónica durante el 2001 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles, ARCOSA y Tejona. -Boletín OSIVAM, 12 (25): 1-9, San José.

Taylor, W., 2003: La actividad sismotectónica durante el 2002 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica de Guanacaste. -Boletín OSIVAM, 14 (26): 1-9, San José.

Taylor, W., 2004: La actividad sismotectónica durante el 2003 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles, ARCOSA y Tejona (Guanacaste). -Boletín OSIVAM, 14 (26): 1-9, San José.

Boletín OSIVAM	Año 16-17, No. 28-29	61-86	San José, Costa Rica, agosto 2006
----------------	----------------------	-------	-----------------------------------

## Referencias bibliográficas del volcán Arenal al 2006

[Scientific References of Arenal Volcano to 2006]

Guillermo E. Alvarado <sup>1</sup>, María I. Sandoval <sup>2</sup> & Luis A. Madrigal <sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica, ICE, Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica

<sup>2</sup> Estudiante Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología

Alvarado, G.E., Sandoval, M.I. & Madrigal, L.A., 2006. Referencias bibliográficas del volcán Arenal al 2006. - Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29); 61-86. San José.

## Introducción

A continuación, presentamos una lista de referencias bibliográficas sobre la mayoría de los trabajos en donde se menciona aspectos relevantes sobre el volcán más activo de Costa Rica y uno de los 17 volcanes más activos del mundo en las últimas décadas.

El Arenal, al cumplir más de 38 años de actividad continua, se ha constituido no solo en un laboratorio natural de las geoquímicas, sino también en un polo de enorme atracción turística.

Por ello, creemos que la presente compilación de trabajos (desde informes inéditos, reportes, boletines, artículos científicos y divulgativos, así como libros) es una base importante para los actuales y futuros investigadores. Consideramos que dicha compilación debe de estar en más de un 95% completa y, por ello, pedimos disculpas si algunos trabajos o notas no fueron incluidos. El formato seguido de dichas referencias en este caso en particular, está hecho siguiendo las instrucciones del J. Volc. Geotherm. Res.

En total hemos llegado a contabilizar un número de 353 referencias bibliográficas hasta el 15 de agosto del 2006. Este número de trabajos es significativamente mayor que aquellos del Arenal compilados en diciembre de 1988 que suman 123 (Alvarado et al., 1988) o los 239 recopilados en julio de 1998 (Alvarado & Torres, 1998).

Abarca, S. & Matamoros, R.G., 2006. Actividad del volcán Arenal durante el período 2004-2006. Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29); 26-36. San José.

Acosta, P., 2006. Caracterización y variabilidad en el tiempo de la frecuencia en los "chugs" del volcán Arenal, entre junio del 2004 y junio del 2005. Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29); 37-47. San José.

Aguilar, C.H., 1977. Introduction to the Archeology of the Arenal Volcano Area: Tephrostratigraphy and Cultural Sequences. National Geogr. Soc. Res. Resp. 1977 Projects: 95-107.

Allegre, C.J., Codominés M., 1976. Fine chronology of volcanic processes using  $^{238}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$  systematics. Earth Planet. Sci. Lett. 28, 395-406.

Anderson, A.T., 1979. Water in some hypersthenic magmas. J. Geol. 87, 509-531.

Alvarado, G.E., 1984. Aspectos petrológicos - geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica. Thesis Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Univ. Costa Rica; San José.

Alvarado, G.E., 1984. Plan de trabajo para el estudio vulcanológico en el marco del futuro desarrollo y explotación del proyecto hidroeléctrico Arenal y del proyecto Geotérmico Miravalles. Dpto. Geología (Internal report, ICE), Costa Rica.

Alvarado, G.E., 1985. Informe sobre las labores vulcanológicas realizadas en el volcán Arenal y en su evaluación actual (junio 1984-junio 1985). Dpto. Geología (Internal report, ICE), Costa Rica.

Alvarado, G.E., 1985. Consideraciones petrológicas de los estratovolcanes de Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central 3, 103-129.

Alvarado, G.E., Barquerò, R., Boschini, O., Chiesa, S., Carr, M.J., 1986. Relación entre la Neotectónica y el Vulcanismo en Costa Rica. Rev. CIAF. 2 (1-3); 246-254.

Alvarado, G.E., 1987. Algunos depósitos volcánicos de avalanchas calientes direccionales en Costa Rica. III Jornadas Geológicas de Costa Rica, volumen de Resúmenes, San José, pp. 18.

Alvarado, G.E., 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.E., Barquero, R., 1987. Consideraciones sobre la sismicidad y la neotectónica en la cordillera de Tilarán y llanos aluviales adyacentes. III Jornadas Geológicas de Costa Rica, volumen de Resúmenes, San José, pp. 40.

Alvarado, G., 1988. El volcán Arenal: 20 años de actividad continua. Rev. Geol. Amér. Central. 9, 116.

Alvarado, G.E., Argueta S., Cordero, C., 1988. Interpretación preliminar de las deformaciones al volcán Arenal (Costa Rica). Bol. Obs. Vulc. Arenal. 1 (2); 25-43.

Alvarado, G.E., Barquero, R., Hidalgo, G., 1988. Referencias bibliográficas principales sobre el volcán Arenal y áreas vecinas. Bol. Obs. Arenal. 1 (2); 57-67.

Alvarado, G.E., 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, England.

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. Obs. Vulc. Arenal. 1 (1);1-55.

Alvarado, G.E., 1989. Los volcanes de Costa Rica. EUNED, San José.

Alvarado, G.E., 1989. Consideraciones neotectónicas recientes en los alrededores la Laguna de Arenal, Costa Rica. Bol. Obs. Vulc. Arenal. 2 (3); 6-21.

Alvarado, G.E., Morales, L.D., 1989. Historia de la Vulcanología en Costa Rica. In: Ruiz, A (Eds.), Historia de la Ciencia y Tecnológica de Costa Rica, Cartago, pp. 291-314.

Alvarado, G.E., 1991. Nuevas evidencias de neotectonismo en los alrededores del graben de Arenal. Bol. Obs. Arenal. 4 (8);7-10.

Alvarado, G.E., Barquero, R., Morales, L.D., 1991. Type of Volcanic Seismicity al Arenal Volcano, Costa Rica. Workshop on Volcanic Tremor and Magma Flow, Final Report, St. Roman, Alemania.

Alvarado, G.E., Matumoto, T., Borgia, A., Barquero, R., 1992. Síntesis geovulcanológica del Arenal (Costa Rica); 20 años de continua actividad eruptiva (1968-1988). Rev. Geog. Amér. Central 25-26, 413-459.

Alvarado, G.E., Kussmaul, S., Chiesa, S., Gillot, P.-Y., Wörner, G., Rundle, C., 1992. Cuadro cronostratigráfico de las rocas ígneas de Costa Rica basado en dataciones radiométricas. J. Herat. Sc. South. Am. 6 (3); 151-168.

Alvarado, G.E., 1993. Costa Rica: Land volcanoes. Gallo Pinto Press, Cartago, Costa Rica.

Alvarado, G.E., Barquero, R., Boschini, I., Climent, A. Lindholm, C., Taylor, E., 1994. Informe de diagnóstico y de resultados obtenidos por la red Sismológica Digital de Arenal y Miravalles: Período enero-julio 1994. Inf. O.S.V., ICE, SanJosé.

Alvarado, G.E., Benedetti, G., Berman, E., 1994. Neotectonic and morphostructural studies in the Arenal and Tilarán horst, Costa Rica: Assessment of its seismic potential. Abstracts Resúmenes. 9<sup>th</sup> International Seminar on Earthquake Prognostics, San José, pp. 32.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., Arias, F., 1994. La avalancha y el flujo piroclástico del volcán Arenal, Costa Rica, 28 de agosto de 1993. Cuarta Reunión Internacional Volcán de Colima. Colima, México, pp. 52-53. Avíseme



Alvarado, G.E., 1995. Volcanic monitoring and warning systems in Latin America and case studies from Costa Rica. In: Borman, P. (Ed.), Regional Int. Training Course on Seismology and Seismic Hazard Assessment, Lecture and exercise notes, Internet Bericht, Managua, Nicaragua, pp. 367-372.

Alvarado, G.E., Taylor, W.D., Orhnberger, M.M., Soto, G.J., Madrigal, L., 1995. First observations of volcano seismicity at Arenal Volcano (Costa Rica) using a new three component seismic digital network. Inf. O.S.V, ICE, San José.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., 1995. Volcanic eruptions as triggers for geoscientific development in Costa Rica. INHIGEO Symposium Volcanoes and History, Abstract Volume, 62-63.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., 1997. Aspectos petrológicos de las tetras del Arenal a la luz de nuevos datos geoquímicos y cronoestratigráficos. Bol. OSIVAM 7 (13-14); 58-72.

Alvarado, G.E., Schmincke, H. U., Soto, G.J., Sumita, M., 1997. The 1968 basaltic andesita eruption at Arenal volcano (Costa Rica); Fallout, surge or pyroclastic flow?. Volcanic activity an the environment, IAVCEI General Asseembly, Abstracts, Puerto Vallarta.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., 1997. Aspectos Petrológicos de las Tefras del Arenal a la Luz de Nuevos Datos Geoquímicos y Cronoestratigráficos. Boletín OSIVAM 7 (13-14); 58-72.

Alvarado, G.E., Taylor, W.D., Orhnberger, M.M., Soto, G.J., Naranjo, M.T., Boniche, F., Barrantes, J.M., Madrigal, L.A., 1997. Types and source of volcanic seismicity at Arenal (Costa Rica) Remarks from a three-component seismic digital network. Volcanic activity and the environment, IAVCEI General Asembly, Abstracts, Puerto Vallarta.

Alvarado, G.E., Taylor, W.D., Orhnberger, M.M., Soto, G.J., Madrigal, L.A., 1997. First observations of volcanic seismicity at Arenal volcano (Costa Rica) using a new three-component seismic digital network. Bol. OSIVAM. 8 (15-16); 11-45.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., Ghigliotti, M., Frullani, A., 1997. Peligro volcánico del Arenal. Bol. OSIVAM 8 (15-16); 62-82.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., Taylor, W.D., 1998. Los flujos piroclásticos del volcán Arenal del 5 de mayo de 1998 y sus implicaciones para la amenaza de las obras de infraestructura cercana. Bol. OSIVAM 10 (19-20); 1-13.

Alvarado, G.E., Torres, M.E., 1998. Referencias bibliográficas del volcán Arenal y alrededores. Bol. OSIVAM 10 (19-20); 43-64.

Alvarado, G., Acevedo, A.P., Monsalve, M.L., Espíndola, J.M., Gómez, D., Hall, M., Naranjo, J.A., Pulgarín, B., Raigosa, J., Sigarán, C., Van der Laat, R., 1999. El Desarrollo de la Vulcanología en Latinoamérica en el último Cuarto de Siglo XX. Rev. Geofísica. 51, 185-241.

Alvarado, G.E., Arroyo, I., 2000. Los flujos piroclásticos del volcán Arenal (Costa Rica) entre 1975 y 2000: Origen, frecuencia, distribución y peligro asociado. Bol. OSIVAM 12, 39-59.

Alvarado, G.E., 2000. Los volcanes de Costa Rica: Su geología, historia y riqueza natural. EUNED (2<sup>da</sup> ed.), San José.

Alvarado, G.E., Pérez, W., Sigarán, C., 2000. Vigilancia y peligro volcánico. In: Denyer, P., Kussmaul, S. (Eds.), Geología de Costa Rica. Ed. Tecnológica de Costa Rica; Cartago. pp. 251-272.

Alvarado, G.E., Pérez, W., 2000. Ejemplos recientes de crisis y señales volcánicas precursoras en Costa Rica. Rev. Geofísica 52-53, 33-45.

Alvarado, G.E., 2002. Análisis de la Estabilidad del Cono y Comportamiento de la Fundación del Volcán Arenal (Costa Rica) mediante el uso de parámetros adimensionales de acuerdo con el teorema  $\Pi$  de Buchingam. VIII Seminario Nacional de Geotecnia, 3<sup>er</sup> Encuentro Centroamericano de Geotecnistas: "Geotecnia en la Prevención de Desastres en el Entorno". San José, pp. 267-275.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., 2002. Pyroclastic flow generated by crater-wall collapse and outpouring of the lava pool of Arenal Volcano, Costa Rica. Bull. Volcanol. 63, 557-568.

Alvarado, G.E., Carboni, S., Cordero, M., Avilés, E., Valverde, M., Leandro, C., 2003. Estabilidad del cono y comportamiento de la fundación del edificio volcánico del Arenal (Costa Rica). Bol. OSIVAM14 (26); 21-73.

Alvarado, G.E., 2003. Diagnóstico de la estabilidad del cono y comportamiento de la fundación debido al crecimiento del edificio volcánico del Arenal (Costa Rica). M.Sc thesis, Geología con énfasis en Geotécnia e Hidrogeología, Univ. Costa Rica.

Alvarado, G.E., Schmincke, H.U., Soto, G.J., Bolge, L.L., Sumita, M., 2004. The 1968 blast type eruption, Arenal volcano, Costa Rica (in Spanish). V Congreso Geológico Nacional, San José, Costa Rica, Programas y Resúmenes, pp. 25-26.

Alvarado, G.E., Schmincke, H.U., Soto, G.J., Bolge, L.L., Sumita, M., 2004. La erupción tipo blast de 1968, volcán Arenal, Costa Rica. V Congreso Geológico Nacional, Programas y Resúmenes, San José, pp. 25-26.

Alvarado, G.E., Carboni, S., Cordero, M., Avilés, E., Valverde, M., Leandro, C., 2004. Evaluation of volcano stability and basement deformation at Arenal, Costa Rica. IAVCEI, General Assembly 2004, Pucón, Chile.

Alvarado, G.E., 2005. Costa Rica: Land of Volcanoes. EUNED; San José.

Alvarado, G.E., Sandoval, M.I. & Madrigal, L.A., 2006. Referencias bibliográficas del volcán Arenal al 2006. Boletín OSIVAM 16-17 (28-29); 61-86. San José.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., Schmincke, H.-U., Bolge, L.L., Sumita, M., 2006. The 1968 andesitic lateral blast eruption at Arenal volcano, Costa Rica. J. Volcanol. Geotherm. Res.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., Mora, M. & Mora, R., 2006. Experiences of Volcanic Unrest and Volcanic Activity in Costa Rica in the framework of Volcanic Emergency Management and Preparedness Plans. 300<sup>th</sup> Anniversary Volcano International Conference Commemorating the 1706 Arenas Negras Eruption Garachico, Tenererife, Islas Canarias, España, 22-27 de mayo.

Arroyo, I., Alvarado, G.E., Taylor, W., Madrigal, L.A., Arias, F., 2000. La actividad del volcán Arenal durante el año 2000. Bol. OSIVAM 12 (23-24); 15-29.

Avila, G., 1977. Investigaciones realizadas en las redes sismológicas de los proyectos de Arenal y Geotérmico, para el período diciembre 1976-diciembre 1997. Dpto. Geología (Internal report, ICE) San José.

Avila, G., 1978. Investigación y vigilancia del volcán Arenal, Alajuela, Costa Rica. Dpto. Geología (Internal report, ICE), San José.

Axelsson, V., 1996. Studies of botton sediments by X- ray radiographic technique. Sediment accumulation. In: Larsson, S., Sunborg, A (Eds.), The Arenal Reservoir Project. Final Report, AB Hydroconsult, Upala, Suecia.

Barboza, V., Melson, W.G, 1990. Correlación entre las señales sísmicas y los sondeos de las erupciones del volcán Arenal. Bol. de Vulcanología, 21: 8-12.

Barboza, V., Saézn, R., Seismic Monitoring in Costa Rica ´s Active Volcanoes: Rincón de la Vieja, Arenal, Poás, Irazú and Turrialba. Fourth Conf. Cities on volcanoes, Quito, (Abstracts Volume), p. 84.

Bardineff, J. M., 1985. Las nuées ardents. Petrogeneses et volcanologie. Tesis doctoral. Bull. PIRPSEV. (109).

Bardineff, J.M., 1995. Calc-alkaline nuées ardentes: A new classification. J. Geodynamics 3, 303-325.

Barquero, J., 1978-1994. Boletín de Vulcanología. Escuela de Ciencias Geográficas, Univ. Nacional, Heredia.

Barquero, J. 1997. Volcán Arenal. LINSSA, pp. 1-34.

Barquero, R., 1986. Estudio de la actividad sísmica del volcán Arenal: Período 1968-1985. Dpto. Geología. (Inf. Interno ICE), San José.

Barquero, R., Alvarado, G.E., 1987. Los enjambres de temblores en Costa Rica. -III Jornadas Geológicas de Costa Rica, volumen de Resúmenes, San José, pp. 42.

Barquero, R., Alvarado, G.E., 1988. Arenal Volcano (Costa Rica); Seismic signals and it's relation with the Eruptive Phases (1968-1986). Kagoshima Int. Conf. on Volcanoes. Proceedings: pp. 199 - 2001, Japan.

Barquero, R., 1989. Resumen de la actividad del volcán Arenal, período enero-diciembre 1989. Bol. Obs. Vulc. Arenal 2 (4); 5-6.

- Barquero, R., 1989. Estudio geoquímica preliminar de fuentes termales y frías del volcán Arenal. Bol. Obs. Vulc. Arenal 2 (3); 38-55.
- Barquero, R., Alvarado, G.E., 1989. Resumen de la actividad del volcán Arenal, periodo 1988 y enero-junio 1989. Bol. Obs. Vulc. Arenal 4, 7-17.
- Barquero, R., Alvarado, G.E., 1989. Resumen de la actividad del volcán Arenal, período 1988 y enero-junio 1989. Bol. Obs. Vulc. Arenal 2 (3); 1-5.
- Barquero, R., Alvarado, G.E., 1989. Los enjambres de temblores en el arco volcánico de Costa Rica. Bol. Obs. Vulc. Arenal 2 (4); 18-39.
- Barquero, R., Soto, G., 1990. Reporte de la actividad del volcán Arenal enero-junio 1990. Bol. Obs. Vulc. Arenal 3 (5);1-3.
- Barquero, R., Soto, G., 1990. Informe de la actividad del volcán Arenal período julio-diciembre 1990. Bol. Obs. Vulc. Arenal 3 (6); 1-3.
- Barquero, R., Soto, G., 1991. Reporte de la actividad del volcán Arenal, enero-junio 1991. Bol. Obs. Vulc. Arenal 4 (7); 2-4.
- Barquero, R., Alvarado, G.E., Matumoto, T., 1992. Arenal Volcano (Costa Rica) Premonitory Seismicity. In: Gasparini, P., Scarpa, R., Akl, K. (Eds.), Volcanic Seismology. IAVCEI Proceedings in Volcanology 3, 84-95.
- Barquero, R., Barrantes, J.M., Boschini, I., Taylor, W., Alvarado, G.E., Climent, A., 1994. Nueva Red Sismológica Digital Arenal - Miravalles. Rev. Tecnología ICE: Energía - Telecomunicaciones 5 (2); 13-22.
- Barquero, R., Barrantes, J.M., Boschini, I., Taylor, W., Alvarado, G., 1994. La Red Sismológica digital del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM). VI Sem. Nac. Geotecnia, San José, pp. 159-166.
- Beard, J.S., Borgia, A. 1989. Temporal variation of mineralogy and petrology in cognate gabbroic enclaves at Arenal volcano, Costa Rica. Contrib. Mineral. Petrol. 103,110-122.
- Bennet, F.D., Racchinni, S., 1977. Las erupciones del volcán Arenal, Costa Rica. Rev. Geogr. Amér. Central 5-6 (1-2); 7-35.
- Benoit, J.P., McNutt S.R., 1997. New constraints on source Processes of volcanic tremor at Arenal volcano, Costa Rica, using broadband seismic data. Volcanic activity and the environment, IAVCEI General Assembly, Abstracts, Puerto Vallarta.
- Benoit, J.P., McNutt, S.R., Barboza, V., 1997. Amplitude scaling of volcanic tremor at Mt. Spurr, Redoubt, Pavlof, Ulawun, Karkar, Arenal, and Kilauea volcanoes. Volcanic activity and the environment, IAVCEI General Assembly, Abstracts, Puerto Vallarta.
- Bergoing, J.P., 1978. La fotografía aérea y su aplicación a la Geomorfología de Costa Rica. Escuela de Geografía, Inst. Geogr. de Costa Rica, Universidad de Costa Rica.

Berrocal, M., Malavassi, E., 2004. Visiting and Land Use Restriction at Arenal volcano and surrounding: Costa Rica IAVCEI General Assembly, Pucón, Chile.

Berrocal, M., Malavassi, E., 2006. TITAN2D models of Arenal Pyroclastic Flows. Abstract volume, Fourth Conf. Cities on Volcanoes, Quito, p. 34

Bigot, S., Barquero, J., Malavassi, E., 1982. Vigilancia Hidrogeoquímica del volcán Arenal. Bol. Vulcanología 12, 2-7 Heredia.

Bigot, S., Barquero, J., 1986. Estudio hidrogeoquímico del volcán Arenal, contribución a la actividad eruptiva. Bol. Vulcanología 17,7-14.

Bolge, L.L., 2000. Geochemistry of tephros from Arenal Volcano, Costa Rica: Repeated cycles of explosive volcanism. M.S. Thesis, Rutgers Univ. New Brunswick, NJ, USA.

Bolge, L.L., Carr, M.J., Feigenson, M.D., Borgia, A., 2004. Geochemistry and magmatic evolution of explosive tephros ET3 and ET4 from Arenal Volcano, Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central 30, 127-135.

Bolge, L.L., Carr, M.J., Feigenson, M.D. & Alvarado, G.E., 2004. The Geochemical History of Arenal Volcano, Costa Rica. Eos Trans. AGU, 85 (47), p. F1842. Fall Meet. Suppl., Abstract.

Bolge, L.L., 2005. Constraining the magmatic sources of Hawaiian and Central American volcanics. PhD thesis, Rutgers Univ. New Brunswick, NJ, USA.

Bolge, L.L., Carr, M.J., Feigenson, M.D., Alvarado, G.E., 2006. Geochemical stratigraphy and magmatic evolution at Arenal Volcano, Costa Rica. J. Volcanol. Geotherm. Res.

Bolt, B.A., Horn, W.L., Macdonald, G.A., Scott, R.F., 1975. Geological hazards. Earthquakes-Tsunamis-Volcanoes-Avalanches-Landslides-Floods. Springer, New York (2<sup>nd</sup> Ed.).

Borgia, A, Linneman, S.R., 1980: On the Mechanisms of Lava Flow Emplacement and volcano Growth: Arenal, Costa Rica. In: Fink, J.K (Ed.), Lava Flows and Domes Emplacement Mechanisms and Hazard Implications. IAVCEI Proceeding in Volcanology Springer-Verlang, Berlin, pp. 208-243.

Borgia, A., Casertano, L., Cigolini, C., 1982. Double cycle of the NRM during cooling of a lava grow at Arenal volcano, Costa Rica. Bol. Vulcanología 14, 83-85, Heredia.

Borgia, A. Linneaman, S.R., 1983. Kinematics and dynamics of lava flows, Arenal volcano, Costa Rica. 96<sup>th</sup> Annual Meeting, the Geological Soc. Amer. Abstracts with Programs. 15 (6); 530.

Borgia, A., Poore, C., 1983. New crater in Costa Rica. EOS, Trans. American Geophysical Union. 64, 540.

Borgia, A., Linneaman, S., Spencer, D., Morales, L.D., Brenes, J.A., 1983. Dynamics of lava flow fronts. Arenal Volcano, Costa Rica. J. Volc. Geotherm. Res. 19: 303-329.

- Borgia, A., Poore, C., Carr, M.J., Melson, W.G., Alvarado, G.E., 1985. Arenal-Chato Volcanic System, Costa Rica: structural evolution of Cones. EOS 66 (18); 411.
- Borgia, A., Linneaman, S., Morales, L.D. 1987. Formation and evolution of lava flows at Arenal volcano, Costa Rica. Internat. Union Geodesy and Geophysics (IUGG), XIX General Assembly, V5-P7, pp. 417.
- Borgia, A., 1987. Shape and structure of Arenal volcano. Costa Rica. Internat. Union Geodesy and Geophysics, XIX General Assembly (Abstract).
- Borgia, A., 1988. Physical aspects of eruption at Arenal and Poás volcanoes, Costa Rica. Ph.D. Thesis, Princeton Univ.
- Borgia, A., Carr, M., Melson, W.G., Alvarado, G.E., 1988. The Tephra sequence of Arenal volcano, Costa Rica. VII Congreso Geológico de América Central, Programas y Resúmenes de Ponencias. San José, pp.39
- Borgia, A., Poore, C., Carr, M.J., Melson, W.G., Alvarado, G.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.
- Borgia, A., Linneman, S.R., 1990. On the evolution of lava flows and the growth of volcanoes. In: Fink, J.H. (Ed.), Lava Flow and domes. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, pp. 208-243.
- Boundon, G., Rancon, J.P., Traineau, H., Kieffer, G., 1994. Violent reactivation of a dormant volcanoes : The 1968 explosive eruption of Arenal volcano, Costa Rica. Int. Volcanol. Congr. (IAVCEI), Ankara, Turkey.
- Boudon, G., Dagain, J., Semet, M.P., Westercamp, D., 1987. Notice explicative de la Carte Géologique a 1/20 000 du Massif Volcanique de la Soufrière (Departement de la Guadeloupe, Petites Antilles). Bureau de Recherches Géologiques et Minières, pp. 1-43.
- Boundon, G., Rancon, J.P., Kieffer, G., Traineau, H., 1996. L' éruption de 1968 du volcan Arenal (Costa Rica) : Un exemple de réactivation violente d'un volcan en sommeil. Soc. Geol. France, Volcanisme Actif de La Amérique Centrale et du Mexique, Paris, pp.11.
- Boudon, G., Soto, G.J., Alvarado, G.E., Villemant, B., Rossignol, J.C., 1997. The November 1995 hydromagmatic eruption of Rincón de la Vieja (Costa Rica); Recurrent activity of an active hydrothermal system. Volcanic activity and the environment, IAVCEI General Assembly, Abstracts, Puerto Vallarta.
- Bravo, J., 1982. Geomorfología de la Hoja Fortuna (escala 1:50.000). Lic. Thesis, Esc. de Ciencias Geográficas, Univ. Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Burbach, G.V., Frohlich, C., Pennington, W. D., Matumoto, T., 1984. Seismicity and Tectonics of the Subducted Cocos Plate. Geophy Res. 89 (-9); 7719-7734.
- Calegry, P., 1987. Caratteristiche chimiche di alcuni livelli esplosive del volcano Arenal, Costa Rica. Thesis, Univ. degli Studi di Milan, Dip di Scienze della Terra, San José.

Carr, M.J., Stoiber, R.E., 1977. Geologic setting of some destructive earthquakes in Central America. *Geol. Soc. Am. Bull.* 37, 326-337.

Carr, M.J., 1984. Symetrical and segmented variations of physical and geochemical characteristics of the Central America volcanic front. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 20, 231-252.

Carr, M.J., Walker, A.J., 1987. Intra-eruption changes in composition of some mafic to intermediate tephros in Central America. *J. Volc. Geotherm. Res.* 33, 147-159.

Cevo, J., 1976. El impacto de la actividad del volcán Arenal, Costa Rica. *Rev. Geo. Inst. Panam. Geogr. Hist.* Pp. 5.

Chaves, R., 1967. Petrografía de una lava del volcán Arenal. *Inf. Labores Dpto. Geol. Min. Ind, San José.*

Chaves. R., 1969. Características físicas, químicas y mineralógicas de los materiales eructados por el volcán Arenal Costa Rica. Julio de 1968. *Inf. Semestral Enero - Junio, San José.*

Chaves, R., Saéñz, R., 1970. Efectos de las erupciones del volcán Arenal. *Inf. Semestral, enero - junio, San José.*

Chemineé, J.L, Delorme, H., Barquero, J., Avila, G., Malavassi, E., Güendel, F., 1981. Algunos aspectos físicos y químicos de la actividad de los volcanes Poás y Arenal. *Bol. Vulcanología* 11, 12-16, Heredia.

Chiesa, S., 1987. Estudio de las capas piroclásticas (tefras), del volcán Arenal (Costa Rica), con énfasis en la unidad 20 Dpto. Geología (Internal report, ICE), San José.

Chiesa, S., 1987. La mayor erupción pliniana del volcán Arenal, Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central* 6, 25-41.

Chiesa, S., 1987. L' attivita' esplosiva anteriore al 1968 del vulcano Arenal y (Costa Rica). *Convenio di Pisa, Il Vulcanismo Esplosivo. Aspetti Geochomici, magmatologic e di dinamica eruptiva, Italia.*

Chiesa, S., 1991. Compilación de los análisis químicos de las rocas volcánicas de los volcanes Arenal y Chato. *Bol. Obs. Vulc. Arenal* 4 (7); 5-22.

Chiesa, S., 1998. Presencia de xenobiolíticos de nanoplanton calcáreo en tetras plinianas como evidencia de un basamento sedimentario bajo el Arenal. *Bol. OSIVAM* 9 (17-18); 1-4.

Cigolini, C., Borgia, A., 1980. Consideraciones sobre la viscosidad de lavas y la estructura de las coladas del volcán Arenal, Costa Rica. *Rev. Geogr. Amér. Central* 11-23, 131-140.

Cigolini, C., Bogliotti, C., 1982. Phase relationships and immicibility in Arenal Volcano lavas, Costa Rica (Abstract). *Soc. It Min. Petr., Cetraro, Italia.*

- Cigolini, C., Casetano, L., Borgia, A., 1982. Two stage spinel fractionation bearing immiscibility in basaltic andesite: Arenal Volcano Costa Rica. *Bol. Vulcanológico*. 14, 81-82, Heredia.
- Cigolini, C., Bogliotti, C., 1984. Phase relationships and "silicate liquid immiscibility" in Arenal Volcano lava flows, Costa Rica: preliminary studies. *Atti della Accademia delle Scienze di Torino*. 118, 226-236.
- Cigolini, C., Borgia, A., Casertano, C., 1984. Intra-crater activity, aa-block lava, viscosity and flow dynamics: Arenal Volcano, Costa Rica. *J. Volc. Geoth. Res.* 20, 155-176.
- Cigolini, C., Bogliotti, C., 1984. Phase relationship and "silicate liquid immiscibility" in Arenal Volcano lavas, Costa Rica: preliminary studies. *Att Accad Sci. Torino*. 118, 226-236.
- Cigolini, C., 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.
- Cigolini, C., 1998. Intracrustal origin of Arenal basaltic andesite in the light of solid-melt interactions and related compositional buffering. *J. Volcanol Geotherm Res.* 86, 277-310.
- Cigolini, C., Alvarado, G., Bertolino, S., Laiolo, M., Coppala, D., 2004. Syneruptive rheological parameters of Arenal andesite: inference from the juvenile ejecta associated with the 1993 and 2000 pyroclastic flows. IAVCEI General Assembly, Pucón, Chile.
- Climent, A., Boschini, I., Barquero, R., Alvarado, G.E., 1986. Estudios sismológicos en zonas de Proyectos Hidroeléctricos y Geotérmicos en Costa Rica. *Sem. Latinoamericano de Ing. Sismo-resistente, Sem. Ing. Estructural, San José*, pp. 93-12.
- Cole, P. D., Fernández, E., Duarte, E., & Duncan A. M., 2005: Explosive activity and generation mechanisms of pyroclastic flows at Arenal volcano, Costa Rica between 1987 and 2001. *Bull. Volcanol.* 67: 695-716.
- Comisión para la emergencia del Volcán Arenal, Memoria., 1969. San José.
- Costa, F., Streck, M., 2004. Periodicity and timescales for basaltic magma replenishment at Arenal volcano (Costa Rica). IAVCEI.
- Dellino, P., Alvarado, G.E. 1992. Comentario sobre las cenizas estrombolianas recientes del volcán Arenal. *Bol. Obs. Vulc. Arenal*. 5 (9-10); 24-30.
- Denyer, P. Montero, W., Alvarado, G.E., 2003. Atlas tectónico de Costa Rica. Ed. Univ. Costa Rica, San José.
- Donnadieu, F., Mora, M., Druitt, T.H., Alvarado, G.E., 2006. Eruption dynamics of Arenal volcano, Costa Rica: Insights from Doppler radar and seismic measurements. -Abstracts Volume, IV Cities on Volcanoes, IAVCEI, Quito, Ecuador, p. 89.
- Donnadieu, F., Druitt, T., Hervier, C., 2004. Ground – Based Doppler Radar from Explosions of Arenal Volcano. IAVCEI General Assembly, Pucón, Chile, (abstract).



Donnadieu, F., Dubosclard, G., Cordesses, R., Druitt, T., Hervier, C., Kornprobst, J., Fénat, J., Allard, P. & Coltelli, M., 2005. Remotely Monitoring Volcanic Activity with Ground-Based Doppler Radar. EOS 86, 21-24, 201 and 204.

Departamento de Geología, 1975. Gráficos geológicos de perforación y planos de inyección sitio de presa Proyecto Arenal. Dirección Ing. Energía, ICE, San José.

Departamento de Geología, 1977. Informe Geológico de progreso al 20 de diciembre de 1976 en la construcción del Proyecto Arenal. 1 y 4, Dirección Ing. Energía, ICE, San José.

Duarte, E., Fernández, E., 2004. Young travertine deposits related to volcanic activity: Arenal and Rincón de la Vieja volcanoes: Costa Rica. 32<sup>nd</sup> IGC, Florence (Abstract).

Duarte, E., Fernández, E., 2004. Arenal volcano, Costa Rica: 35 years to construct a twin volcano. 32<sup>nd</sup> IGC, Florence (abstract).

Feigenson, M.D., Carr, M.J., 1985. Determination of major, trace and rare elements in rocks using DCP-AES. Chem. Geol. 51, 19-27.

Fernández, M.M., 2004. Informe sobre la actividad del volcán Arenal: 2-6 de julio de 2004. Red Sismológica Nacional (ICE-UCR).

Fisher, T.F., Hilton, D.R., Sharp, Z.D., Walker, J.A., Alvarado, G., Molina, E., Pullinger, C., 2004. The nitrogen isotope systematics of gas discharges from the Central American Volcanic Arc. In: Aguirre-Díaz, G.J., Macías-Vázquez, J.L., Siebe, C. (Eds.); Neogene-Quaternary Continental Margin Volcanism-Proceedings of the GSA Penrose Conf. at Metepec Puebla, Mexico, p. 22.

Fudali, 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, 233-401.

Garcés, M.A., Hagerty, M.T., Schwartz, S.Y., 1998. Magma acoustics and time-varying melt properties at Arenal volcano, Costa Rica. Geophys. Res. Lett. 25 (13), 2293-2296.

Geoconseil., 1978, Incidencias del sismo del 14 de abril 1973 sobre el Proyecto. (Internal Report, ICE); San José.

Geotermica Italiana-ICE, 1992. Evaluación del riesgo y monitoreo del volcán Arenal. (Internal Report) O.T, Pisa.

Geotermica Italiana-ICE, 1996. Evaluación de Riesgo y Monitoreo del volcán Arenal. (Internal Report), O.T, Pisa.

Gill, J.B, 1981. Orogenic Andesites and Plate tectonics. Springer-Berlang, Berlín.

Gillot, P.-Y., Chiesa, S., Alvarado, G.E., 1990. Chronostratigraphy and evolution of the Plio-Pleistocene volcanism in north Costa Rica: The Arenal volcano structural framework. Abstract Volume, International Volcanological Congress, Mainz, pp. 37.

Gillot, P.-Y., Chiesa, S., Alvarado, G.E. 1994. Chronostratigraphy of Upper Miocene-Quaternary volcanism in northern Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central 17, 45-53.

Ghigliotti, M., Frullani, A., Alvarado, G.E., Soto, G.J., 1991. Distribución areal y características de los depósitos de tefra más recientes (1080-1968 d.C.) del volcán Arenal. Bol. Obs. Vulc. Arenal 4 (8); 11-33.

Ghigliotti, M., Frullani, A., Alvarado, G.E., Soto, G.J., 1992. Tefroestratigrafía, historia y ciclos eruptivos del volcán Arenal. Bol. Obs. Vulc. Arenal 5 (9-10); 52-96.

Güendel, F., 1978. On the relationship between earth tides and volcanic activity at Arenal Volcano, Costa Rica M.Sc. Thesis, Univ. of Texas.

Güendel, F., Malavassi, E., 1980. La actividad del volcán Arenal entre los días 15 al 20 de agosto de 1980. Bol. Vulcanología. 9, 34-4, Heredia.

Hagerty, M.T., Schatz, S.Y., Protti, J.M., Garcés, M., Dixon, T., 1997. Observations at Costa Rican Volcano Offer Clues to Causes of Eruptions. EOS 78 (49); 570 - 571.

Hagerty, M.T., Schatz, S.Y., Protti, J.M., (en prensa). Preliminary analysis of seismic observations at Arenal Volcano. Volcanology and Seismology.

Hagerty, M.T., Schatz, S.Y., Garcés, M.A., Protti, J.M., 2000. Analysis of seismic and acoustic observations at Arenal volcano, Costa Rica, 1995-1997. J. Volcanol. Geother. Res. 101, 27-65.

Hantke, G., 1976. Arenal. Bull Volcanic Eruptions. 14, 59-59.

Hernandez, J., Tournoun, J., 1978. Analyse chimique des verres volcaniques riches en silice á la microsonde électronique (par utilisation des détecteurs d' énergie des rayons X). C.R. Acad. Sci. Paris D. 287, 1087-1090.

Herstrom, E.A., Reagan, M.K., Morris, J.D., 1985. Variations in lava composition associated with flow of asthenosphere beneath southern Central America. Geology 23 (7); 617-620.

Hidalgo, A., 1997. Evaluación sobre la eventual generación de una gran ola (Seiche) en el Embalse de Arenal, debido a la entrada de un flujo de detritos volcánicos. Bol. OSIVAM 8 (15-16); 46-56.

Instituto Costarricense de Electricidad., 1972. Datos relacionados con la erupción del volcán Arenal del año 1968. Anexo 1 de Informe Interno, San José.

ICE, 1975. Gráficos geológicos de perforación y planos de inyección sitio de presa Proyecto Arenal. (Internal report, ICE), San José.

ICE, 1977. Informe geológico de progreso al 20 de diciembre de 1976 en la construcción del Proyecto de Arenal. Internal report ICE, 4 tomes + maps, San José.

Jongmans, A.G., Mulder, J., Groenestein, K., Buurman, P., 1996. Soil surface coatings at Costa Rican recently active volcanoes. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 1871-1880.

Jongmans, A.G., Breemen, van N., Gradstein, S.R., Oort, van F., 2000. How liverworts build hanging gardens from volcanic ash in Costa Rica.

- Kerle, N., 1996. An economic evaluation and human perspective for a moderate volcanic eruption at Arenal. *Bol. Obs. Vulc. Arenal* 6 (11-12); 53-70.
- Kudo, A.M., Ciggolini, C., Singer, B., Husler, J.W., 1985. Crustal xenoliths in recent basaltic andesite flows from Arenal Volcano, Costa Rica. *EOS* 66 (46); 11-35.
- Kusssmaul, S., Sprechmann, P., 1982. Estratigrafía de Costa Rica (América Central), II: Unidades Litoestratigráficas Igneas. V Congreso Latinoamericano de Geología, Buenos Aires, Argentina, pp. 73-19.
- Kusssmaul, S., Paniagua, S., Gainza, J., 1982. Recopilación, clasificación e interpretación petroquímica de las ígneas de Costa Rica. *Inf. Sem, julio - dic. Inst. Geogr. Nac., San José.*
- Kusssmaul, S., Tournoun, J., Alvarado, G.E., 1991. Evolución de las rocas plutónicas y volcánicas subcalcinas del Neógeno y Cuaternario de Costa Rica. *Memorias Simposio sobre Magmatismo Andino y su Marco Tectónico* 1, 23-44.
- Kusssmaul, S., Tournoun, J., Alvarado, G.E., 1994. Evolution of the Neogene to Quaternary igneous rocks of Costa Rica. *Profil.* 7, 97-123.
- Larrson, S., Sundbporg, A., 1996. The Arenal Reservoir Project. Final Report. A-Hydroconsult, Uppsala, Suecia.
- 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); 44-56.
- Leandro, C.E., Alvarado, G.E., 1988. Relationship of the sun-moon tides at the Arenal volcano activities. *Int. Workshop of Volcanic Seismology, Capri, Italy, Abstracts*, p. 82.
- Leandro, C.E., Alvarado, G.E., 1999. Estudio Geológico-Geofísico de una sección oriental y occidental en el volcán Arenal. *Bol. OSIVAM*, 20-21, 48-58.
- Leeman, W.P., Carr, M.J., Morris, J.D., 1984. Boron geochemistry of the Arenal American Volcanic Arc: Constraints on the genesis of subduction-related magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 58, 149-168.
- Leeman, W.P., Carr, M.J., 1995. Geochemical constraints of subduction processes in the Central American Volcanic Arc: Implications of boron geochemistry. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper.* 295, 57-73.
- Lesage, P., Mora, M., Alvarado, G.E., Métaxian, J.P., 2004. Complex behaviour and evidence of double source for the volcanic tremor at Arenal volcano. Costa Rica, EGU, Nice.
- Lesage, P., Mora, M.M., Alvarado, G.E., Pacheco, J., Métaxian, J.P., 2006. Complex behavior and source model of the tremor at Arenal volcano, Costa Rica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*
- Liaw, H.B., 1981. Seismic velocity modeling from an ensemble of earthquakes. Ph.D. Thesis, Univ. Texas at Dallas.

- López, A., 1999. Neo- and Paleostress partitioning in the SW corner of the Caribbean Plate and its fault reactivation potential. Ph.D. Thesis, Tübingen Geowissenschaftliche Arbeiten. 53, 1-294.
- López, D.L., Soto, G.J., Alvarado, G.E., Barquero, R., Boschini, I., Fernández, J.F., Arias, F., Madrigal, L., 1994. The Hydrothermal Waters of Arenal Volcano, Costa Rica. GSA 1994 Annual Meeting, Seattle, pp. 24-27.
- López, D.L., Bundschuh, J., Soto, G.J., Fernández, J.F., Alvarado, G.E., 2006. Chemical evolution of thermal springs at Arenal Volcano, Costa Rica: Effect of volcanic activity, precipitation, seismic activity, and Earth tides. J. Volcanol. Geotherm. Res.
- Lücke, O. & Sandoval, M., 2006: Tendencias estacionales de la hidrogeoquímica de los manantiales termales del volcán Arenal (2004 - 2005). Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29); 1-10. San José.
- Lundstrom, C.C., Boudreau, A.e., Petermann, M., 2004. Diffusion-reaction between basaltic andesite and gabbro at 0.5 Gpa: an explanation for anorthitic plagioclase? American Geophysical Union Abstract Fall.
- Lunney, M., 2002. Andesitic magma evolution based on textural and compositional analysis of plagioclase phenocrysts of Arenal volcano, Costa Rica. M.Sc. Thesis, Portland State University, Portland, Oregon, USA.
- Mc.Clelland, L., Simkin, T., Summers, M., Nielsen, E., Stein, T.C., 1989. Global Volcanism 1975-1985. Prentice Hall.
- Madrigal, R., Rojas, G., 1980. Manual descriptivo del Mapa Geomorfológico de Costa Rica (escala 1.200.000). SEPSA, Imprenta Nacional, San José.
- Malavassi, E., 1979. Geology and Petrology of Arenal Volcano, Costa Rica. M.Sc. Thesis, Univ. of Hawaii, 111 p.
- Malavassi, E., 1980. Cronología de las coladas de lava del volcán Arenal. Bol. Vulcanología 9-5, Heredia.
- Malavassi, E., Barquero, J., 1980. Cronología de las coladas de lava del volcán Arenal. Bol. de Vulcanología, 15-5, Heredia.
- Malavassi, E., 1981. Avances en la evaluación del riesgo potencial en el volcán Arenal: Costa Rica. Simposio su Rischio sísmico e vulcánico, IILA, Roma.
- Malavassi, E., Sáenz, R., Barquero, J., 1982. Excursión al volcán Arenal. Bol. Vulcanología 14,136-148, Heredia.
- Malavassi, E., 1991. Magma sources and crustal processes at the southern terminous of the Central American Volcanic Front. Ph.D. Thesis, Univ. Santa Cruz.

- Malavassi, E., Fernández, E., Duarte, E., Van der Laat, R., Berrocal, M., Barboza, V., Hernández, E., Marino, T., Saenz, W., Hernández, L., 2004. Vent, voluminous lava emissions, steep slopes and pyroclastic flows at Arenal volcano, Costa Rica. EOS. Trans. AGU 85 (47) (Fall meet. Suppl., V23D-03).
- Marini, L., Guidi, M., Fernández, J.F., Barquero, R., 1990. Análisis geoquímicas de las fuentes termales y frías del volcán Arenal. Bol. Obs. Vulc. Arenal 3 (6); 9-27.
- Matumoto, T., 1968. Seismological observations at Mt. Arenal and other volcanoes in Costa Rica. Preliminary report (unpublished).
- Matumoto, T., 1976. Prediction of a volcanic eruption implied from seismic data. Rev. Geogr. Inst. Panamericano de Geografía e Historia 5, 285-293.
- Matumoto, T., Latham, G.V., 1976. Results from the Arenal Seismic Network. Inst. Costarricense de Electricidad, Dpto. Geología (Internal Report, ICE), San José.
- Matumoto, T., Umaña, J., 1975. Informe sobre la erupción del volcán Arenal ocurrida el 17 de junio de 1975. Dpto. Geología, ICE (Informe Interno), San José.
- Matumoto, T., Umaña, 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, 299-315.
- Matumoto, T., Latham, G., Ohtake, M., Umaña, J., 1976. Seismicity studies in northern Costa Rica. Trans. Am. Geophys. Union, EOS 57, 290.
- Matumoto, T., Umaña, J.E., 1977. Seismic activity at Volcano Arenal, Costa Rica. EOS Trans. Am. Geophys. Union 58 (6); 540.
- Matumoto, T., Latham, G., Ohtake, M., Umaña, J., 1977. Crustal Structure in Southern Central America. Bull. Seism. Soc. Amer. 67 (1); 121-134.
- Matumoto, T., Ohtake, M., Layham, G., Umaña, J., 1977. Crustal structure in southern Central America. Bull. Seismol. Soc. Am. 67, 121-134.
- Meloy, A.F., 2004. "A probabilistic event tree analysis (ETA) of the risk posed by Arenal-Type pyroclastic flows at the popular resort of Arenal volcano, Costa Rica. M.Sc. Geo hazard Ass. Thesis, Univ. Portsmouth, England.
- Meloy, A.F., 2006. Arenal-type pyroclastic flows: A probabilistic event tree risk analysis. Jour. Volc. Geotherm. Res.
- Melson, W.G., Saénz, R., 1968. The 1968 eruption of Volcan Arenal: preliminary summary of field laboratory studies. Smithsonian Center for Short-Lived Phenomena, Report 7. Trad. Española: La erupción del volcán Arenal. Costa Rica en julio de 1968, Rev. Geogr. Amer. Central 5-6, 55-148.
- Melson, W.G., Saénz, R., 1973. Volume, energy and cyclicity of eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica. Bull. Volcanol. 37-3, 416-437.

- Melson, W.G., 1978. Arenal volcano (summary). In: Arenal Project, Report 4 (Internal Report, ICE), San José.
- Melson, W.G., Umaña, J.E., Evans, E., 1979. Arenal Volcano: Results of dry tilt Measurements. SEAN Bull. 4 (2); 13-16.
- Melson, W.G., 1982. Alternation between acidic and basic magmas in major explosive eruptions of Arenal volcano, Costa Rica. Bol. Vulcanología 14, 65-74, Heredia.
- Melson, W.G., 1984. Prehistoric eruptions of Arenal volcano, Costa Rica. Vínculos. 10 (1-2); 34-59.
- Melson, W.G., 1986. The cyclical nature of explosive volcanism. A petrologic approach to volcano forecasting. Proceed Workshop Volcanic Hazards in California, pp. 99-118.
- Melson, W.G., Barquero, J. H., Saézn., R., Fernández, E., 1986. Erupciones explosivas de importancia de Costa Rica. Bol. Vulcanología 16, 15-19.
- Melson, W.G., 1988. Major Explosive Eruptions of Costa Rica Volcanoes: Update for Costa Rican Volcanism Workshop. Costa Rican Volcanism Workshop, Skyland, Virginia, (unpublished) p. 6.
- Melson, W.G., Barquero, J. H., Saézn., R., Fernández, E., D'Hearn, T., Jerez, D., 1988. Arenal volcano, Costa Rica. Eruption Frequency, Intensity and Types. Costa Rican volcanism workshop. Skyland, Shenandola Nat. Park, Virginia, (unpublished) p.8.
- Melson, W.G., Barquero, J. H., Saézn., R., Fernández, E., D'Hearn, T., Jerez, D., 1988. Arenal volcano, Costa Rica. Eruption Frequency, Intensity and Types. Costa Rican volcanism workshop. Skyland, Shenandola Nat. Park, Virginia, (inédita), pp.8.
- Melson, W.G., 1989. Las erupciones del volcán Arenal 1 al 13 de abril 1989. Bol. Vulcanología 20, 15-22, Heredia.
- Melson, W.G., 1994. The eruption of 1968 and tephra stratigraphy of Arenal volcano. Archaeology, volcanism and Remote Sensing in the Arenal Region, Costa Rica, University of Texas Press, pp. 24-47.
- Melson, W.G., 1995. Eruptive patterns, Arenal volcano, Costa Rica 1978-94. Trans Am Geophys Union EOS abs.
- Merino, J., 1968. Resumen de las observaciones hechas sobre la reciente erupción del volcán Arenal. Inf. Semestral, Inst. Geogr. Nac., San José.
- Métaxian, J.P., Lesage, P., Barquero, R., Creusot-Eon, A., 1996. Características espectrales de las señales sísmicas y estimación de Vp en las estructuras superficiales del volcán Arenal. Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal, 6 (11-12), 23-44.
- Métaxian, J.P., Lesage, P., Vlette, B., 2002. Locating sources of volcanic tremor and emergent events by seismic triangulation: application to Arenal volcano, Costa Rica. J. Geophys. Res. 107 (B10), 2243.

Minakami, T., Utibori, S., Hiraga, S., 1969. The 1968 Eruption of Volcano Arenal, Costa Rica. *Bull. Earth. Res. Inst.* 47, 783-802.

Minakami, T., 1974. Prediction of volcanic eruptions. In: Civetta, L., Gasparini, P., Luongo, G., Rapolla, A. (Eds.), *Physical Volcanology*. Elsevier Sci. Publ. Co., pp. 313-333. Elsevier, Amsterdam.

Miyamura, S., 1980. *Sismicidad de Costa Rica*. Ed. Univ. Costa Rica, San José.

Molina, J.R., 2003. *El volcán Arenal: El coloso de San Carlos*.

Montero, W., 1984. Informe sismológico del volcán Arenal, período de junio a agosto de 1984. Dpto. Geología (Internal Report, ICE), San José.

Montero, W., Denyer, P., Barquero, R., Alvarado, G.E., and Machette, M., 1998. Database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and offshore regions. A project of the International Lithosphere Program II-2, Major Active Faults of the World.

Mora, M., 1998. Análisis espectral del tremor armónico del volcán Arenal (Costa Rica) y modelización de su fuente. Lic. Thesis, Escuela de Centroamericana de Geología, Univ. Costa Rica.

Mora, M., Lesage, P., Dorel, J., Bard, P., Métaixian, J., Alvarado, G.E., Leandro, C., 2001. Detection of seismic site effects by using H/V spectral ratios at Arenal volcano (Costa Rica). *Gophys. Res. Lett.* 28, 2991-2994.

Mora, M., 2003. Etude de la structure superficielle et de l'activité sismique du volcan Arenal, Costa Rica. Ph.D. Thesis, Université de Savoie, France.

Mora, M., Lesage, P., Alvarado, G.E., Métaixian, J.P., 2004. Comportamiento complejo y evidencia de una doble fuente sísmica en el tremor armónico del volcán Arenal, Costa Rica. V Congreso Geológico Nacional, Programas y Resúmenes, San José, pp. 121-122.

Mora, M.M., Lesage, P., Valette, B., Alvarado, G.E., Leandro, C., Métaixian, J., Dorel, J., 2005. Shallow velocity structure and seismic site effects at Arenal volcano, Costa Rica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 152, 121-139.

Mora, M., Soto, G.J., Alvarado, G.E. & Lesage, P., 2006. Deformation produced by the 1968-2006 lava field of Arenal volcano, Costa Rica, measured during the 1986-2000 period. -300<sup>th</sup> Anniversary Volcano International Conference Commemorating the 1706 Arenas Negras Eruption Garachico, Tenererife, Islas Canarias, España, 22-27 de mayo.

Mora, S., Alvarado, G.E., Morales, L.D., 1992. Mapa preliminar sintético de Amenazas geológicas de Costa Rica. Su importancia en el desarrollo de la infraestructura civil. *Rev. Geogr. Amér. Central* 25-26, 355-312.

Mora, S., 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 1:500000. Primer Congr. Nac. Sobre Desastres Naturales, Univ. Nacional, Heredia.

Morales, L.D., Soley, J.F., Alvarado, G.E., Borgia, A., Soto, G.J., 1980. Análisis 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.

Morales, L.D., Alvarado, G., Soley, J., Borgia, A., Soto, G., 1987. Señales sísmicas relacionadas con la actividad del Poás. III Jornadas Geológicas de Costa Rica., Volumen de Resúmenes, San José.

Mueller, M., 1984. The Silencio Stratigraphic Sequence (Appendix A en Nelson, 1984). Vínculos 10 (1-2); 51-55.

Murillo, S., Ruiz, P., 2004. Datos paramétricos de las coladas de lava del volcán Arenal (Costa Rica) entre 1968 y 2002. Boletín OSIVAM, 15 (27), 25-33.

Paniagua, S., Cosillo, A., Mora, O., Sánchez, L., Esquivel, L., Soto, G.J., Alvarado, G.E., Arredondo, S., 1990. Principales referencias bibliográficas sobre volcanología de América Central con énfasis en Costa Rica (1960-1988). Bol. Obs. Vulc. Arenal 3 (5); 29-60.

Paniagua, S., 2002. Síntesis de algunos volcanes Activos y peligrosos de América Central. Prevención, Preparación y Mitigación. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres.

Peraldo, G., 1995. Actividad histórica del volcán Arenal. Reflexiones 40, 3-15.

Quirós, T., 1954. Geografía de Costa Rica. Ministerio de Obras Públicas y Transportes e Inst. Geogr. de Costa Rica.

Reagan, M.K., Gill, J.B., Malavassi, E., García, M.O., 1987. Changes in magma composition at Arenal volcano, Costa Rica, 1968-1985: Real time monitoring of open system differentiation. Bull. Volcanol. 49, 415-434.

Reagan, M.K., 1988. U-Series Equilibrium and Disequilibrium in Plagioclase From Arenal Volcano, Costa Rica. EOS. 69 (44); 1509.

Reagan, M.K., Tepley III, F.J., Gill, J.B., Lundstrom, C., 2004. Degassing time scales implied by ( $^{210}\text{Pb}$ ) and ( $^{210}\text{Po}$ ) values for andesitic lavas erupted in 2003 from Anatahan an Arenal volcanoes. IAVCI, General Assembly, Pucón, Chile.

Reagan, M.K., Tepley, F.J., Gill, J.B., Cooper, K., Garrison, J., 2005. Degassing and crystallization time-scales implied by  $^{210}\text{Po}$ - $^{210}\text{Po}$ - $^{226}\text{Ra}$  activities for lavas from Anatahan, Arenal and Mount St. Helen. Goldschmidt Abstracts. Moscow Idaho.

Rohery, D., Oppenheimer, C., Glaze, L., 1990. Combining Landsat TM infrared data with an air photograph of an eruption of Volcan Arenal (6 February 1986). Bol. Obs. Vulc. Arenal 3 (6); 4-8.

Ryder, C., Gill, J., Tepley, F., Ramon, F., 2004. Closed to open Crustal-level Differentiation During Eruption of Andesite-Arenal, Costa Rica, 1968-2003. IAVCEI, General Assembly, Pucón, Chile.



- Ryder, C.H., Gill, J.B., Tepley, F., Ramos, F., Reagan, M., 2006. Closed to open system differentiation at Arenal Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*
- Sachs, P.M., Alvarado, G.E., 1994. Metamorphic basement in Costa Rica? *Terra Nostra, Schriften der Alfred Wegner Stiftung*, 14. Geowissenschaftliches Lateinamerika Kolloquium, Tübingen.
- Sachs, P.M., Alvarado, G.E., 1996. Mafic metaigneous lower crust beneath Arenal Volcano (Costa Rica); Evidence from xenoliths. *Bol. Obs. Vulc. Arenal* 6 (11-12); 71-78.
- Sáenz, R., 1968. Sobre la erupción y efectos de la actividad reciente del volcán Arenal, julio-agosto de 1968. Dpto. Geología y Minas, San José.
- Sáenz, R., 1971. Aparatos volcánicos y fuentes termales de Costa Rica. *Inf. Técn. Notas Geol.* 41: 1-16; San José.
- Sáenz, R., 1977. Erupción del volcán Arenal en el año 1968. *Rev. Geog. Amér. Central* 5-6 (1-2); 149-188.
- Sáenz, R., Hantke, C., 1977. Arenal. *Bull. Volcanic Eruptions.* 15, 52-53.
- Sáenz, R., Melson, W., 1977. La erupción del volcán Arenal en julio de 1968. *Revista Geográfica de América Central* 5-6, Universidad Nacional, pp. 55-148.
- Salguero, M., 1976. *Volcanes de Costa Rica*. Ed. Costa Rica, San José.
- Sawdo, R.M., Simon, I., 1969. Tiltmeter installation Arenal volcano in Costa Rica. *Inf. Arthur D. Little, Inc. Cambridge, E.U.A.*
- Schmincke, H.U., 2004. *Volcanism*. Springer.
- Sean Bull., 1977-1988. Vol. 2-13. Washington D.C.
- Sheets, P.D., Muller. M., 1984. Investigaciones arqueológicas en la Cordillera de Tilarán, Costa Rica 1984. *Vínculos* 10 (1-2); 1-236.
- Sheets, P.D., Muller. M., 1984. The Proyecto Prehistórico Arenal: an introduction. *Vínculos* 10 (1-2), 17-29.
- Sheets, P.D., Hoopes, J., Melson, W., McKee, B., Sever, T., Mueller, M., Chenault, M., Bradley, J., 1991. Prehistory and volcanism in the Arenal Area, Costa Rica. *J. Field Archaeol.* 18, 445-465.
- Siebert, L., Kimberly, P., Calvin, C., Luht, J.F., Matlietti, G.K., 2006. *Volcanoes of Central America*. Smithsonian Insti. Global Volcanism Program, Windows 9x
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Stix, J. (Eds.), 2000. *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.
- Simkim, T., 1968. Mt. Arenal volcanic eruption. Costa Rica. 29 July-3 Aug: Event Chronology. Smithsonian Center for Short-lived Phenomona.

- Simkim, T., Sigbert, L., McClelland, L., Bridge, D., Newhall, C., Latter, J.H., 1981. Volcanoes of the World. Smithsonian Institution, Hutchinson Ross Publ. Co, Pennsylvania.
- Simkim, T., Siebert, L., 1994. Volcanoes of the world. Geosciences. Press Smithsonian Inst.
- Simkim, T., Siebert, L., 2000. Earth's volcanoes and eruptions: an overview. In: Sigurdsson, H., Houghton, B., MacNutt, S.R., Stix, J. (Eds.), Encyclopedia of volcanoes. Academic Press, pp. 249-261.
- Simon, I., Sawdo, R., Saénz, R., Melson, W.G., 1969. Preliminary Results from Tiltmeter Recording at Arenal Volcano, Costa Rica. EOS (Trans. Amer. Geophys Union).
- Simon, I., Sawdo, R., Saénz, R., Melson, W.G., 1970. Preliminary results from tiltmeter recording at Arenal Volcano, Costa Rica. Arthur D. Little. Inc. Cambridge, E.U.A.
- Soto, G.J., Taylor, W.D., Naranjo, T., 1988. Los registros de temores del volcán Arenal entre 1994 y 1997: Su estadística y el comportamiento dinámico del volcán. Bol. OSIVAM 10 (19-20); 35-42.
- Soto, G.J., Alvarado, G.E., 1989. Procesos volcánicos asociados con el agua subterránea. El caso de los volcanes Arenal y Poás. Costa Rica. Memoria del III Congreso Nacional de Recursos Hídricos, San José, Costa Rica, pp. 249-261.
- Soto, G.J., Alvarado, G.E., 1990. Procesos hidrovulcánicos ejemplificados en volcanes de Costa Rica. VII Congreso Geológico de América Central, San José, Costa Rica, pp. 80.
- Soto, G.J., 1991. Analysis of dry tilt data 1988-1990, Arenal Volcano, Costa Rica. The Final Report of the Group Training Course in Volcanology and Volcano Sabo Engineering 1990-1991. Japan Intern. Cooper. Agency, Tokyo, pp. 73-103.
- Soto, G.J., 1991. Análisis de inclinometría seca del volcán Arenal, 1988-90. Bol. Obs. Vulc. Arenal 4 (7); 33-61.
- Soto, G.J., Barquero, R., 1991. Volcán Arenal: Resumen de la actividad durante el período julio - diciembre de 1991. Arenal Volcano: Summary of the Activity during the Period July - December, Bol. Obs. Vulc. Arenal 4 (8); 2-6.
- Soto, G.J., Alvarado, G.E., 1992. Deformación del terreno asociada al peso del campo de coladas de lava 1968-presente, volcán Arenal, Costa Rica. Tercera Reunión Nacional "Volcán de Colima" y Segunda Reunión Internacional de Vulcanología, Colima, México, pp. 79.
- Soto, G.J., Arias, F., Barquero, R., 1992. Resumen de la actividad del volcán Arenal durante 1992. Summary of Arenal's volcanic activity during 1992. Bol. Obs. Vulc. Arenal 5 (9-10); 7-23.

Soto, G.J., 1993. Arenal Volcanological Observatory (OVA); 1988-1993 research and new volcano knowledge. 1993 WOVO WORKSHOP: Volcano Observatories, Surveillance of Volcanoes and Prediction of Eruptions, Isla de Guadalupe, Antillas Francesas, pp.109-111.

Soto, G.J., 1993. Las lavas de octubre 1991 a octubre 1992 del volcán Arenal. Informe OSV. 93.3, ICE, San José.

Soto, G.J., López, D.L., Fernández, J.F., Alvarado, G.E., 1995. Caracterización geoquímica de las aguas termales del Arenal (Costa Rica) dentro de su marco geovolcanológico. V Congreso Nacional de Recursos Hídricos, Memoria Técnica, Costa Rica, pp. 40-50.

Soto, G.J., 1996. Problemática de la sismicidad volcánica: ¿Qué sucede y qué registramos? El caso que conozco: El Arenal. In: Boschini, I. (Ed.), Memoria del Primer Taller de Actualización de la Red Sismológica Nacional (RSN:ICE-UCR), Informe O.S.V. 96.10. ICE, San José.

Soto, G.J., Alvarado, G.E., Madrigal, L.A., 1996. Las posibles erupciones del volcán Arenal en 1915 y 1922. Bol. Obs. Vulc. Arenal 6 (11-12); 45-52, 1993.

Soto, G.J., Arias, F., Alvarado, G.E., Madrigal, L.A., Barquero, R., 1996. Resumen de la actividad del volcán Arenal durante 1993. Summary of Arenal's volcanic activity during 1993. Bol. Obs. Vulc. Arenal 6 (11-12); 5-22.

Soto, G.J., 1997. La actividad del volcán Arenal durante 1994. Bol. OSIVAM 7 (13-14); 53-57.

Soto, G.J., 1997. La actividad del volcán Arenal durante 1995. Bol. OSIVAM 8 (15-16); 56-61.

Soto, G.J., 1998. Ceniza eructada por el volcán Arenal, 1992-1997. Bol. OSIVAM 10 (19-20); 14-24.

Soto, G.J., Arias, F., 1998. Síntesis de la actividad del volcán Arenal, año 1996. Bol. OSIVAM 9 (17-18); 11-18.

Soto, G.J., Alvarado, G.E., Ghigliotti, M., 1998. El registro eruptivo de Arenal en el lapso 3000-700 años antes del presente y nuevas deducciones sobre la edad del volcán. Bol. OSIVAM. 9 (17-18); 19-49.

Soto, G.J., López, D.L., Fernández, J.F., Alvarado, G.E., 1999. Caracterización geoquímica de las aguas termales del Arenal (Costa Rica). Bol. OSIVAM 11 (21-22); 1-20.

Soto, G.J., Alvarado, G.E., Bonilla, J., Madrigal, J., Mata, A., Ramírez, R., Rojas, L., Salazar, J., Tristán, E., Villegas, A., 2000. Las facies proximales de la gran erupción piroclástica basáltica ET-3 del volcán Arenal. Bol. OSIVAM 12 (23-24); 54-63.

Soto, G.J., Sjöbohm, L., 2005. Sobre el mapeo de los peligros volcánicos del Arenal (Costa Rica) como una herramienta para la planificación del uso del suelo y la mitigación

de desastres. Memoria VIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica, San José, Costa Rica, setiembre 2005. 26 pp.

Soto, G.J. & Alvarado, G.E., 2006. Eruptive history of Arenal Volcano, Costa Rica, 7 ka to present. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*

Steinberg, G.S., Lorenz, V., 1983. External Ballistic of Volcanic Explosions. *Bull. Volcanol.* 46, 333-348.

Stoiber, R., Carr. M., 1973. Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America. *Bull. Volcanol.* 37, 304-325.

Streck, M.J., Dungan, M.A., Malavassi, E., Reagan, M.K., Bussy, F., 2002. The role of basalt replenishment in the generation of basaltic andesites of the ongoing activity at Arenal Volcano, Costa Rica: evidence from clinopyroxene and spinel. *Bull. Volcanol.* 64, 316-327.

Streck, M.J., Dungan, M.A., Bussy, F., Malavassi, E., 2005. Mineral inventory of continuously erupting basaltic andesites at Arenal volcano, Costa Rica: implications for interpreting monotonous, crystal – rich, mafic arc stratigraphies. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 140 (1-3), 133-155.

Sundborg, A., 1996. Prediction of the lifetime of the reservoir. In: Larsson, S., Sundborg, A (eds.); *The Arenal Reservoir Project. Final Report A- Hydroconsult*, Uppsala, Suecia, pp. 107-118.

Szramek, L., Gardner, J., Larsen, J., 2006. Degassing and microlite crystallization of basaltic andesite magma erupting at Arenal Volcano, Costa Rica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*

Taylor, W.D., Barquero, R., 1998. Auscultación sísmológica del campo Geotérmico Miravalles y volcán Arenal durante 1997. *Bol. OSIVAM* 10 (19-29); 25-34.

Taylor, W., Madrigal, L., Soto, G., 2004. La actividad del volcán Arenal durante el año 2003. *Bol. OSIVAM* 15 (27), 11-24.

Tepley III, F.J., Lundstrom, C.C., Williams, R.W., Gill, J.B., 2005. U-Th-Ra disequilibria and the time-scale of andesite differentiation at Arenal volcano, Costa Rica (1965-2003). *Goldschmidt Conference Abstracts*.

Tera, F., Brown, L.D., Morris, J.D., Sacks, S.I., Klein, J., Middleton, R., 1986. Sediment incorporation in island-arc magmas: inferences from <sup>10</sup>Be. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50, 535-550.

Thorpe, R.S., Francis, P.W., Moorbath, S., 1979. Strontium isotope evidence for petrogenesis of Central American andesites. *Nature* 277; 44-45.

Tournon, J., Alvarado, G.E., Mora, S., Rivier, F. & Chiesa, S., 1987. Mapa geológico de Costa Rica (1:500.000). III Jornadas Geológicas de Costa Rica, Volumen de Resúmenes, San José, pp. 17.

Tournon, J., 1983. La cadena volcánica Cuaternaria de Costa Rica: Composiciones químicas de las lavas, presencia de dos tipos de series. Inf. Semestral jul - dic, San José.

Tournon, J., 1984. Magmatismes du mesozoïque à l'actuel en Amérique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andésites. Tesis doctoral, Mém. Sc Terre, Univ. Pierre et Marie Curie, París.

Tournon, J., Alvarado, G.E., 1997. Carte géologique du Costa Rica. Mapa geológico de Costa Rica. Folleto explicativo, échelle-escala 1:500 000. Ed. Tecnológica de Costa Rica, San José.

Trejos, 1959. Geografía de Costa Rica. Imp. Universal, San José.

Umaña, J.E., Mainieri, A., Bruce, E., Alfonso, P., Fernández, M., Rivet, J., Pautre, A., Edmond, R., 1972. Informe geológico de progreso del proyecto Hidroeléctrico de Arenal. Informe interno, Inst. Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica.

Umaña, J.E., Mainieri, A., Alfonso, P., De la Torre, P., Laporte, G., 1973. Informe geológico y viabilidad, Proyecto Arenal, Dpto de Geología, (Internal Report, ICE), San José, Costa Rica.

Umaña, J.E., Mainieri, A., Mojica, E., 1974. Primer informe de Progreso al Proyecto de Arenal. Dpto. Geología (Internal Report, ICE), San José, Costa Rica.

Umaña, J.E., Güendel, F., Pautre, A., 1979. Contribución d' un barrage dans une zone sismiquement et volcanologiquement active. Bull. Inter. Assoc. Eng. Geol. 20, 117-120.

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., 1986. Metodologías geodésicas para la predicción y vigilancia volcánica: Su aplicación en Costa Rica. Rev. CIAF 2 (1-3); 90-102.

Van der Laat, R., 1988. Deformaciones asociadas al vulcanismo activo de Costa Rica entre 1981 y 1988. Costa Rica Volcanism Workshop, Skland, Shenandoah Nat. Park, Virginia (unpublished), pp. 12.

Van der Laat, R., Carr, M.J., 1989. In: McClelland, L., Simkin, T., Nielsen, M., Summers, E., Stein, T.C. (Eds.), Global Volcanism 1975-1985: The First Decade of Reports from the Smithsonian Institution's Scientific Event Alert Network (SEAN). Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. Pp. 510-511

Vargas, C., Vindas, A. & González C., 2006. Análisis de las cenizas eruptadas por el volcán Arenal durante abril de 1992 a agosto del 2001 y enero del 2004 a mayo del 2006 con respecto al tipo de actividad. Boletín OSIVAM, 16-17 (28-29); 11-25. San José.

Vargas, G., 1985. La sucesión vegetal primaria en una región de vulcanismo reciente en el volcán Arenal y alrededores, Costa Rica. Rev. Biol. Trop. 33 (2); 171-183.

- Vargas, G., 1987. Análisis de las formaciones vegetales y uso del suelo de la cordillera de Tilarán y la cuenca inferior del río Bebedero, Costa Rica. *Geoistmo* 1 (1); 67-91.
- Vargas, G., Cortes, V., Zúñiga, W., 1992. Evolución de la dinámica vegetal entre 1985 y 1993 sobre las lavas recientes (1968-92) y flujos piroclásticos (1968) del volcán Arenal. *Bol. Obs. Vulc. Arenal*. 5 (9-10); 31-51.
- Villari, L., 1984. Vulcano Arenal, Costa Rica. Evaluazione preliminare del rischio. Istituto Italo Latine Americano (ILLA), (Internal Report, ICE), Roma.
- Villemant, B., 1996. Origina du déséquilibre  $^{238}\text{U}$  B  $^{230}\text{Th}$  dans les magmas des zones de subduction: exemple d 'Arenal. *Soc. Geól. France, Volcanisme Actif de L'Amérique Centrale du Mexique*, Paris, p.10.
- Villemant, B., Boudon, G., 1997. The 1968 explosive eruption of Arenal volcano, Costa Rica: Stratigraphy, vesicularity and geochemistry of the products. IAVCEI, Puerto Vallarta, Mexico, General Assembly, Abstracts, p. 156.
- Wade, J.A., Plank, T., Hauri, E.H., Melson, W.G., Soto, G., 2004. High water contents in basaltic melt inclusions from Arenal volcano, Costa Rica, *Eos Trans. AGU Fall Meeting Abstract* 85 (47), V23D-05.
- Wade, J.A., Plank, T., Melson, W.G., Soto, G., Hauri, E.H., 2006. The volatile content of magmas from Arenal volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*
- Wadge, G., 1982. El campo de flujos de lava 1968-1980 y las tasas de erupción del Magma en el volcán Arenal. *Bol. Vulcanología* 14, 75-78, Heredia.
- Wadge, G., 1983. The magma budget of Arenal volcano, Costa Rica from 1968 to 1980. *J. Volc. Geotherm. Res.* 19, 281-302.
- Wadge, G., Oramas Dorta, D., Cole, P.D., 2006. The magma Budget of Arenal volcano, Costa Rica, from 1980 to 2004. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*
- Waldron, H., 1968. The 1968 eruption of Arenal volcano, Costa Rica. Reporte, U.S. Geol. Surv. American Embassy (unpublished), San José.
- Williams-Jones, G., Stix, J., 1977. RN, CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> degassing at Arenal Volcano, Costa Rica. Volcanic activity and the environment, IAVCEI General Assembly, Abstracts, Puerto Vallarta, pp.77.
- Williams-Jones, G., Stix, J., Heiligmann, M., Barquero, J., Fernandez, E., Gonzalez, E.D., 2001. A model of degassing and seismicity at Arenal Volcano, Costa Rica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 108, 121-139.
- Williams, H., McBirney, A.R., 1979. *Volcanology*. Freeman, Cooper & Co, San Francisco.
- Zapata, M.I., Soto, G.J., 1990. Lahares antiguos y recientes en el volcán Arenal, Costa Rica. *Bol. Obs. Vulc. Arenal* 3 (5); 4-28.

Zimmer, M.M., 2002. Volatile chemistry of the Costa Rican segment of the Central American Volcanic Front. M.Sc. Thesis, Univ. New Mexico.

Zimmer, M.M., Fisher, T.P., Hilton, D.H., Alvarado, G.E., Sharp, Z.D. & Walker, J.A., 2004. Nitrogen systematics and gas fluxes of subduction zones: Insights from Costa Rica arc volatiles. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G<sup>3</sup>)*, 5(5); 1-19, doi: 10.1029/2003GC000651.

Zimmermann, J.I., Cheminée, J.L., Dolorme, H., 1985. Chemical analyses and diffusion studies of gases in andesitic lavas: Arenal Volcano (Costa Rica). *Chemical Geol.* 61 (1-4); 299-308.

Zobin, V.M., 2001. Seismic hazard of volcanic activity. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 112, 1-14.