

**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD (ICEL)**  
**UEN: PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS**

**DIRECCIÓN DE INGENIERÍA CIVIL**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**  
**OFICINA DE SISMOLOGÍA Y VULCANOLOGÍA**

**BOLETÍN DEL**



**AÑO 10, N° 19 - 20, SAN JOSÉ, COSTA RICA**

**PUBLICADO EN JULIO DE 1998**

**ISSN 1015-4396**

Instituto Costarricense de Electricidad (ICEL)

UEN: PROYECTOS Y SERVICIOS ASOCIADOS

Dirección de Ingeniería Civil  
Departamento de Geología

**OFICINA DE SISMOLOGÍA Y VULCANOLOGÍA**

**BOLETÍN DEL OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y VULCANOLÓGICO  
DE ARENAL Y MIRAVALLS**

Editores:  
Guillermo E. Alvarado  
Luis A. Madrigal

Año 10, Nº, 19 - 20

San José, Costa Rica

Impreso en los Talleres de la Oficina de Publicaciones del ICE  
Julio de 1998

ISSN 1015-4396

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

Oficina de Sismología y Vulcanología  
Departamento de Ingeniería Geológica  
Instituto Costarricense de Electricidad  
Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica

Teléfonos (Telephones): (505) 220-7741; 695-6522

Fax: (506) 220-8212; 695-5193

e-mail: wtaylor@cariari.ucr.ac.cr

gainduni@cariari.ucr.ac.cr

guialva@msmail.ice.go.cr

El Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM) es parte de la Oficina de Sismología y Vulcanología del Departamento de Ingeniería Geológica del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) la cual, Conjuntamente con la Sección de Sismología, Vulcanología y Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología (Universidad de Costa Rica), constituyen la Red Sismológica Nacional (RSN:ICE-UCR).

The Arenal and Miravalles Seismological and Volcanological Observatory (OSIVAM) is part of the Seismology and Volcanology Office of the Department of Geological Engineering of the Costa Rican Institute of Electricity (ICE), which together with the Section of Seismology, Volcanology and Geophysical Exploration of the Central American School of Geology (University of Costa Rica), constitute the National Seismological Network (RSN:ICE-UCR).

\*Miembro de la Organización Mundial de Observatorios de Volcanes (WOVO).

\*Member of the World Organization of Volcano Observatories (WOVO).

## EDITORIAL

El volcán Arenal cumple 30 años de continua actividad eruptiva desde su trágico despertar en la mañana del 29 de julio de 1968. Con ello pasó de ser un volcán prácticamente desconocido para la comunidad científica costarricense y mundial, para llegar a convertirse en uno de los 100 volcanes más conocidos en el mundo y uno de los 10 más activos de finales del siglo XX. Fue mencionado en los periódicos quizás por primera vez en 1922, a raíz de unas supuestas erupciones, o en 1923 debido a una visita pastoral de Monseñor Monestel (Obispo de Alajuela) a los indios Guatusos (Malekos). Se puso tímidamente como volcán Canaste sobre un mapa geológico de Costa Rica por primera vez en 1925 por K. Sapper. Pero no fue sino hasta el 24 de febrero de 1937 en que fue fotografiada y medida oficialmente su cumbre, dejándose entrever su actividad fumarólica.

Los primeros estudios geológicos, hidrológicos y topográficos de detalle, obedecen a las investigaciones realizadas por el ICE para el P.H. Arenal a partir de 1965, cuando desde ya en ese entonces se advertían ciertas anomalías volcánicas.

Desgraciadamente, los fenómenos sismo-volcánicos premonitores del Arenal no fueron suficiente aviso para una población campesina arraigada a su tierra prodigiosa, ni para los científicos. Ello trajo consigo la mayor catástrofe volcánica en vidas humanas registrada en Costa Rica hasta el momento. El número oficial de defunciones y desaparecidos fue de 78.

Han transcurrido 10 años desde que conmemoramos los "100 años de estudios Sismográficos en Costa Rica (1888-1988) y el 20 aniversario de actividad del volcán Arenal (1968-1988)". Paralelo a este evento, se editó el primer **Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal (OVA)**, hoy día como **Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM)**. Este boletín sintetiza parte de la información de carácter sismológico y vulcanológico que el ICE recopila y procesa en forma periódica a travez de sus labores normales, tendientes a darle seguimiento a las amenazas potenciales que puedan dañar o causar problemas operativos al Complejo Hidroeléctrico Arenal-Corobicí-Sandillal y en el Complejo Geotérmico de Miravalles y, próximamente, Tenorio. Al publicar este volumen 10, complementamos 56 artículos para 827 páginas en total, donde se ha plasmado el grado de avance de las investigaciones que se han realizado, en particular sobre el Arenal, un "volcán laboratorio" y hasta un "volcán turístico". Sin embargo, aún en su corto historial de unos 7000 años, nos recuerda que no se le puede considerar siempre como tranquilo, sino como uno de los volcanes más peligrosos del mundo. En efecto, nuestros estudios evidencian que el actual período de erupciones pequeñas a moderadas, tan sólo es un paso transitorio para futuras explosiones más violentas, que ocurrirán en algún momento en los próximos años, décadas o siglos pero, sin lugar a dudas, se repetirá su historia cataclísmica, para nuevamente retornar a su estado latente. De ahí, que la prevención y la planificación son las mejores herramientas ante las amenazas naturales, en nuestro caso, el peligro volcánico.

## PREFACE

Arenal volcano commemorates its 30th anniversary of continuous eruptive activity since the tragic awakening in the morning of July 29, 1968. From this, the almost unknown volcano for the costarrican and world scientific community, became one of the 100 most remarkable in the world and one of the 10 most active volcanoes of the XX century final decades.

It was first mentioned by newspapers back in 1922, after some supposed eruptions, or in 1923 because the pastoral visit of Monseñor Monestel (Alajuela's province Bishop) to the Guatuso indians (Malekos).

It was shyly mentioned as Canaste volcano in a geologic map of Costa Rica, for the first time in 1925, by K. Sapper. But it was until February 24, 1937 when its summit was officially measured and photographed, showing its fumarolic activity.

The first geologic, hydrogeologic and topographic detail studies were carried on by ICE for the Arenal Hydroelectric Project since 1965, and at that time, several volcanic anomalies were detected.

Unfortunately, seismo-volcanic premonitory phenomena at Arenal was not enough notice for the population of farmers living nearby, nor for the scientists. This provoked the most important volcanic catastrophe in human lives recorded in Costa Rica up till now. The official number of deaths and vanished people was 78.

10 years have elapsed since the commemoration of the "100 years of Seismological studies in Costa Rica (1888-1988)" and the "20th anniversary of activity at Arenal (1968-1988)". Simultaneously with this event, the first Boletín del Observatorio Vulcanológico Arenal (OVA), today as Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), was edited. This bulletin synthesizes part of the seismological and volcanological information that ICE records and process periodically within its normal duties, tending to monitor the potential hazards that can threaten or cause operative problems to the Arenal-Corobici-Sandillal Hydroelectric Complex and to the Miravalles Geothermal Complex, as well as Tenorio, in a near future.

With the publication of volume 10, we complete 56 papers, a total of 827 pages, where the achievements with the research carried out, in particular at Arenal, a laboratory and a turistic volcano, have been stamped. Nevertheless, its short history of 7000 years, remind us that it can not be considered a quiet volcano, but one of the most dangerous of the world. In fact, our investigations show that the present period of small and moderate eruptions, is only a transition to future more violent explosions which can take place any moment in the next years, decades or centuries, but, without doubt, its cataclismic history can be repeated, for another return to a latent state afterwards. This is why, the prevention and planification are the best tools against the natural hazards, in our case, the volcanic hazard.

## Índice

Guillermo E. Alvarado, Gerardo, J. Soto & Waldo D. Taylor <b>LOS FLUJOS PIROCLÁSTICOS DEL VOLCÁN ARENAL DEL 5 DE MAYO DE 1998 Y SUS IMPLICACIONES PARA LA AMENAZA DE LAS OBRAS DE INFRAESTRUCTRA CERCANA .....</b>	1
Gerardo J. Soto <b>CENIZA ERUPTADA POR EL VOLCÁN ARENAL, 1992-1997 .....</b>	14
Waldo D. Taylor & Rafael A. Barquero <b>AUSCULTACIÓN SISMOLÓGICA DEL CAMPO GEOTÉRMICO MIRAVALLER Y VOLCÁN ARENAL DURANTE 1997 .....</b>	25
Gerardo J. Soto, Waldo D. Taylor & Marco T. Naranjo <b>LOS REGISTROS DE TREMORES DEL VOLCÁN ARENAL ENTRE 1994 Y 1997: SU ESTADÍSTICA Y EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL VOLCÁN .....</b>	35
Guillermo E. Alvarado & María E. Torres <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL VOLCÁN ARENAL Y ALREDEDORES .....</b>	43

**Las opiniones vertidas por los autores de los artículos son de su propia y entera responsabilidad, y el Boletín del OSIVAM no toma necesariamente éstas como su posición oficial.**

**LOS FLUJOS PIROCLÁSTICOS DEL VOLCÁN ARENAL DEL 5 DE MAYO DE 1998 Y SUS IMPLICACIONES PARA LA AMENAZA DE LAS OBRAS DE INFRAESTRUCTURA CERCANA**

**PYROCLASTIC FLOWS OF ARENAL VOLCANO OF MAY 5, 1998 AND ITS IMPLICATIONS FOR THE HAZARD OVER LOCAL INFRASTRUCTURE**

**Guillermo E. Alvarado, Gerardo J. Soto & Waldo D. Taylor**

Oficina de Sismología y Vulcanología, y Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), Instituto Costarricense de Electricidad, Apdo. 10032-1000 San José, Costa Rica.

Alvarado, G.E., Soto, J.G. & 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. -Boletín OSIVAM, 10 (19-20): 1-13, 1997; San José.

**RESUMEN**

En la tarde del 5 de mayo de 1998, una serie de flujos piroclásticos de bloques y cenizas descendieron del cráter del Arenal unos 2 km a ~60 km/h por el valle del río Tabacón, y se detuvieron unos 1600 m antes del balneario y centro turístico de Tabacón. La nube de cenizas acompañante -producto de la fricción interbloques y levantada por los gases que escapan- se precipitó al sur y suroeste hasta las Juntas de Abangares (35 km al SW). No hubo pérdidas económicas o en vidas humanas, aunque unas 450 personas llegaron a ser evacuadas. Flujos similares en los últimos 30 años (al menos un flujo cada 2,5 años como promedio) y en épocas prehistóricas se han llegado a extender entre 0,5 y 4 km del centro eruptivo. Si un evento de estos ocurriese bajo condiciones de escasa visibilidad (nublado, con lluvia, de noche), su percepción sería casi nula y muy tardía, en particular si se piensa que pueden recorrer 4 km en unos 4 ó 5 minutos. La represa de Sangregado no fue afectada por estos eventos, y el sitio de presa no ha llegado a ser afectado por eventos similares en los últimos 7000 años, tal y como se discute en el presente informe y en otros precedentes, focalizados ampliamente hacia este tópico en particular.

**ABSTRACT**

Around 12:20 (Local time = GMT-6 hours) of May 5, 1998, Arenal started a series of block and ash flows over its northwestern flank, on the upper watershed of Tabacón Valley. Several flows occurred almost continuously during the first half hour, and then separated by several minutes (i.e., events at 13:05-13:17, 14:20, 14:27-35, 14:40, 14:50, 15:10, 15:16, 15:30, 15:47, and 16:00) until around the 18 hours. A total of 23 flows were recorded. Although pyroclastic flows have been common here in the past, rarely have so many repeatedly erupted over the course of hours.

No explosions were recorded as triggers of flows. Triggering event seems to be the partial collapse of a little piece of the NNW wall of the cone that contains the lava pool. This produced the outpouring and fragmentation of the pasty -almost solidous- lava cap, and then the flows. These went down some 2 km long, reaching the 720 m contour level. Velocity was estimated ~60 km/h, and a rough estimation of the total volume mobilized is half a million cubic meters (which is about one quarter of that deposited in 1993 pyroclastic flow). Some minor explosions were recorded by the Arenal network (OSIVAM: 6 digital stations around Arenal), being them after the decompression of the lava pool by the "lava slides". Fortunately, one of our colleagues at ICE (Fernando Alvarado) was at fieldwork in Arenal and took several dozen pictures. From them and other sources, we can state that some flows were relatively small and simple, running down only 1 km with a single front. Other were with 2 or 3 lobes, moving at different velocities, more voluminous, and reaching a 2 km maximum length. The accompanying ash columns were swept by the winds over a SW axis, reaching up to Las Juntas de Abangares, 35 km SWward. Fine ashes were calculated in only 200 tons. A deep gully (~10-20 m deep, ~50 m wide, ~400 m long) was excavated along the steep NNW flank of the volcano by the eroding flows. A couple of acres of newly growing forest (over previous lava flows erupted during 80's) was destroyed, and some trees were still slowly burning on May 6. A new blocky lava flow developed at the site of origin of the pyroclastic flows, during night, and started filling up the gully.

Most of the coarse components of the deposits are faceted blocks, and less than 5% are bulbous lava lumps (like those deposited in 1993). This suggests that most of the ejected material formed the crust or cap of the lava pool. During a fieldwork the day after, we found several tens of small fumaroles, steaming from the ashy matrix of deposits. The measured temperature 15 cm below the surface reached 105°C, and some lava lumps, with open cracks were evidently hot ( $T \gg 150^\circ\text{C}$ ). Tabacón Resort is located 1.6 km downstream the valley, from the edge of the deposits. People scared from viewing the events in a rare clear day, and evacuated the place immediately by themselves. No one was injured. A "red alert" was called by Comisión Nacional de Emergencias, forbidding the pass through Tabacón valley and completing an evacuation of over 400 people. Alert switched its color to yellow the day after. Because the nice weather, mass media covered extensively the events, sometimes increasing fictitiously the magnitude of them. This kind of pyroclastic flows are not rare in Arenal, being the most remarkable those occurred in June 1975 and August 28, 1993. All of them have found their way along Tabacón valley.

## INTRODUCCIÓN

Aproximadamente a las 12:20 p.m. del 5 de mayo de 1998, personal destacado en el OSIVAM (Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles, ICE) comenzaron a notar anomalías en la falda NNW del Arenal. Reportaron una nube muy densa y oscura de cenizas que bajó lentamente por las faldas del volcán, hacia el valle de Tabacón. Esta nube corresponde a lo

que los vulcanólogos denominan flujo piroclástico. Este flujo fue seguido por dos más (12:36 y 12:38 p.m.). El viento se llevó sus cenizas hacia el sur, hasta precipitarse en los alrededores del volcán Chato, en el caserío de El Castillo e incluso en las Juntas de Abangares (35 km al SW). Es por ello que la OSV dio la voz de alerta a la Comisión Nacional de Emergencia (CNE) a la 1:10 p.m. El

asistente de Sismología del ICE, Marco Naranjo (OSIVAM), el Geól. Fernando Alvarado, así como los turistas observadores, reportaron varias avalanchas o flujos piroclásticos más, aproximadamente a las 1:05-1:17, 2:20, 2:27-35, 2:40, 2:50, 3:10, 3:16, 3:30, 3:47, y 4 p.m., unas 23 avalanchas o flujos piroclásticos fueron producidos hasta las 5:42 p.m. Esa misma tarde, el personal de la OSV se trasladó al volcán con el fin de hacer observaciones, que se realizaron en la noche del día 5 y madrugada del 6 de mayo, y ese mismo día en la mañana se introdujo en la zona afectada.

Producto de esta secuencia de eventos eruptivos, parte de los turistas y lugareños en los alrededores del Parque Nacional Volcán Arenal, se asustaron algunos, y se admiraron los otros. Por ello, el balneario *Tabacón Resort* fue evacuado (un total de unas 70 personas entre clientes y empleados) por iniciativa de sus propietarios. Paralelamente se declaró alerta roja por parte de la CNE, y se cerró el paso del camino que comunica a La Fortuna con la represa de Sangregado (ruta 142), y se evacuó a unas 450 personas entre visitantes y lugareños del flanco norte del volcán.

## DEFINICIONES

### ¿QUÉ ES UN FLUJO PIROCLÁSTICO?

Se trata de un flujo de material volcánico (piroclástico: cenizas hasta grandes bloques métricos) semifluidizado, que está controlado por la gravedad y se desplaza lateralmente a ras del suelo. En un flujo esencialmente laminar con una alta concentración de partículas, en que la fase continua entre ellas es el gas, y la relación partículas/gas es elevada (alta concentración). Pueden desplazarse a gran velocidad (40-200 km/h) y viajar entre 1 y 20 km o más del centro emisor, en función de su energía y capacidad de transporte. Las oleadas piroclásticas son, en cambio, corrientes turbulentas de baja concentración y densidad, fluidizadas, donde la fase continua entre las partículas es gas. Suelen acompañar a

los flujos piroclásticos y, en detalle, es probable que exista una gradación completa entre los flujos piroclásticos y las oleadas.

### DIFERENCIA ENTRE ERUPCIÓN Y EXPLOSIÓN

Una erupción consiste en la salida de material volcánico (lava o piroclastos) por una boca eruptiva (cráter o fisura), ya sea de manera pasiva (colada de lava o derrumbe volcánico) o explosiva. Una explosión se refiere a la expansión súbita del material volcánico por efecto del gas magmático o del vapor generado por una causa hidrogeotérmica (acumulación de vapor de agua) o hidromagmática (vapor resultado de la interacción entre el agua y el magma). Es decir, una explosión es a su vez una erupción, pero no todas las erupciones, son explosiones.

## LOS EVENTOS ERUPTIVOS DEL 5 DE MAYO

Una serie de fotografías y vídeos fueron tomados por turistas, medios noticiosos y por el Geól. Fernando Alvarado (Dpto. de Ingeniería Geológica). Por ello es factible el realizar una interpretación secuencial con base en esta información y en los relatos de los testigos. De la observación de un número de por lo menos 9 eventos piroclásticos se desprende que su magnitud (volumen y extensión) varió notoriamente entre ellos. Algunos fueron colapsos menores de corta extensión (aprox. 1 km) y que conformaron un flujo único y simple (p. ej. los de las 2:35 y 2:50 p.m.), mientras que los otros alcanzaron una distancia de unos 2 km y fueron flujos

volumétricamente mayores, y más complejos, con al menos 2 ó 3 frentes de flujo a velocidades diferenciales (Fotos 1 y 2). Tanto en las fotografías como en los filmes, se observa el frente de detrito (el flujo piroclástico *sensu stricto*) con una nube de cenizas acompañante que se separa progresivamente del flujo denso basal por efecto convectivo (diferencia térmica) y además debido al viento predominante, en ese momento hacia el SW. Con base en mediciones de la duración realizadas por el Geól. Fernando Alvarado y de un vídeo, se pudo calcular una velocidad promedio de estos flujos, de 60 km/h.

### SISMICIDAD VOLCÁNICA

En los registros sismológicos digitales (Figuras 1 y 2), los flujos o avalanchas piroclásticas se reconocen por su contenido de frecuencias (1-10 Hz) y por su duración entre 1 y 20 minutos (promedio de 5,4 minutos). Por supuesto, esta duración no sólo involucra el flujo piroclástico como tal (escasos 2-3 minutos), sino también los derrumbes menores (bloques y demás detritos inestables) acompañantes de cada evento. Muy pocas explosiones se registraron durante la crisis piroclástica, una de ellas a las 2:27 p.m. Sin embargo, a la hora de analizar cuidadosamente las señales (aplicando filtros) y el

documental fotográfico y fílmico, se observa que junto con algunas avalanchas, se dieron explosiones, como sucede en las erupciones de flujos piroclásticos tipo Merapi (p. ej. en el Unzen, en Japón, entre 1991 y 1995) secundarias, pues al colapsar parte del lago de lava, se provoca una descompresión generada por el deslizamiento, y una liberación súbita de los gases (la señal sísmica se muestra en la Figura 1); en otros no hubo explosión alguna (Figura 2). Pese a ello, se debe aclarar, que no hubo reportes de detonaciones escuchadas, por lo que las explosiones fueron de baja magnitud.



Foto 1: Flujo piroclástico en descenso por el valle del río Tabacón (3:16 p.m.). En primer plano se observa el balneario *Tabacón Resort*. Al fondo, a unos 1600 m se distinguen varios frentes del flujo piroclástico durante su avance tempestivo y las columnas de cenizas acompañantes levantándose (Fotografía #10A captada por Fernando Alvarado).



Foto 2: Flujo piroclástico captado desde La Palma (3:47 p.m.). Se observan avanzando al menos dos frentes de flujos piroclásticos, la nube de cenizas acompañante y la pequeña explosión secundaria desencadenada en el cráter cuspidal (Fotografía #22A captada por Fernando Alvarado).

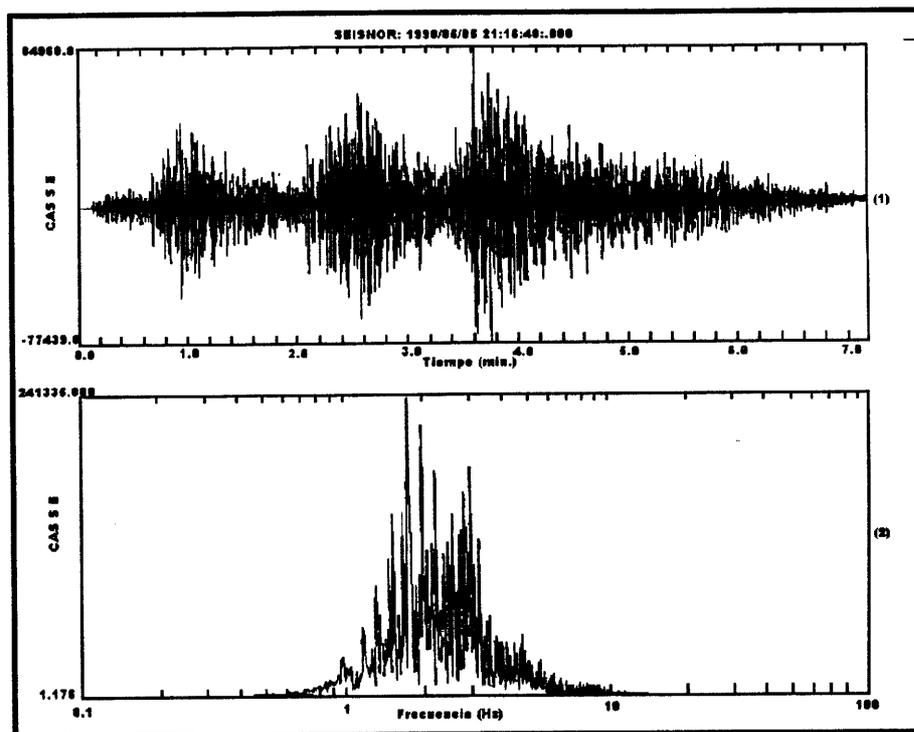


Figura 1: Registro sismográfico digital con su espectro de frecuencia correspondiente a un flujo piroclástico del Arenal con una señal explosiva asociada (estación CAS, 5/5/1998, 3:16 p.m.).

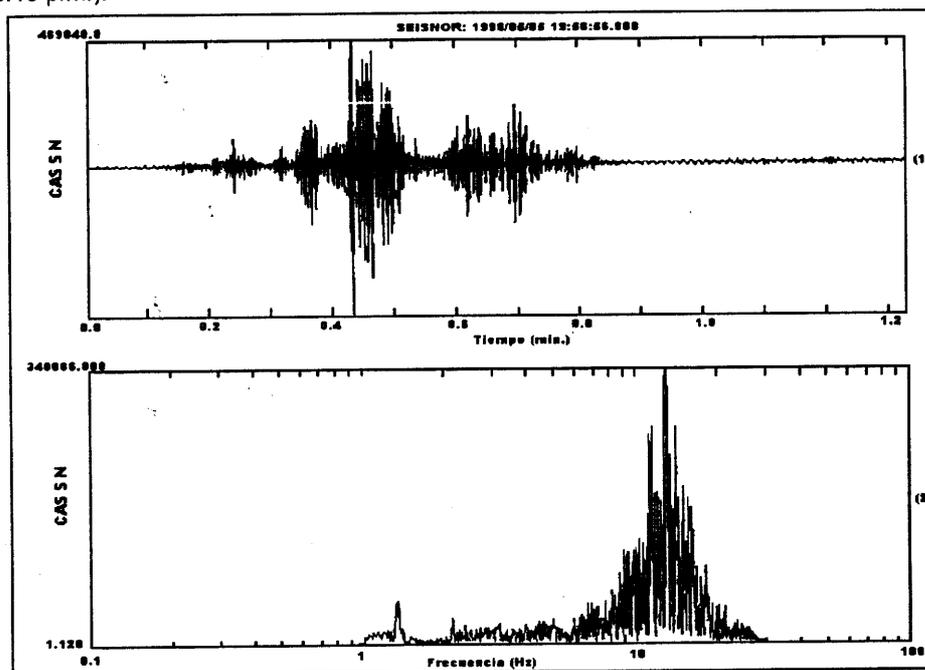


Figura 2: Registro sismográfico digital con su espectro de frecuencia correspondiente a una avalancha o flujo piroclástico del volcán Arenal (estación CAS, 5/5/1998, 3:56 p.m.).

La frecuencia de los tremores durante los días 3 al 5 de mayo (previos a los flujos), por ejemplo, estuvieron entre 2,1 y 2,5 Hz (promedio de 2,2 Hz), mientras que durante la crisis eruptiva (períodos de calma relativa interflujos) variaron entre 1,6 y 3,0. Posterior a la erupción, las frecuencias variaron regularmente durante los días 6 y 7 de mayo entre 1,5 y 2,8 Hz (promedio de 2,1

Hz). Esto va de acuerdo con los modelos propuestos (Alvarado *et al.*, 1997c), en donde los tremores de frecuencia  $\geq 2,1$  Hz indican que el lago de lava cratérico tiene una corteza bien desarrollada, mientras que con frecuencias  $< 2,1$  Hz, sugieren un lago de lava con una corteza de enfriamiento poco desarrollada o poco espesa.

### LOS DEPÓSITOS

Los flujos piroclásticos generaron, por erosión, una cárcava en el flanco norte del volcán. El depósito se presenta como bloques de lava subangulares, centimétricos a métricos (1,5 x 3,5 x 4 m), algunas pocas tortas de lava (<5%), en una matriz de detritos de lava centimétricos hasta tamaño ceniza. Superficialmente se observan varias unidades de flujo, con estructuras poco desarrolladas de levées, frentes de flujos de pendiente elevada y gran cantidad de ceniza superficial producida por la interacción de los clastos a elevada temperatura. La vegetación boscosa fue destruida por completo y quemada en parte (una superficie aproximada de 2 Ha), lo cual aunado al hecho de la existencia de tortas de lava y de temperaturas aún elevadas en la matriz y los bloques ( $\geq 525^{\circ}\text{C}$ ), son indicios

inequívocos de su alta temperatura. La matriz poseía una temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$  a 15 cm de profundidad 15 horas después del último evento. En diferentes sectores se observaron pequeñas fumarolas, con desprendimiento predominante de vapor de agua. Debido al efecto de la salida de los gases, la ceniza fina fue elutriada (evacuada) y se originaron en algunas de ellas pequeñas depresiones con forma de embudo, con un diámetro de algunos decímetros. Los flujos se detuvieron a unos 1600 m del balneario de Tabacón y su volumen se calcula, de manera preliminar, en  $5 \times 10^5$  m<sup>3</sup> (una cuarta parte del volumen del flujo de 1993 *sensu* Soto *et al.*, 1996). La ceniza fina que se extendió hacia el área suroeste del volcán alcanza una masa de apenas 200 toneladas.

### RECUESTO BREVE DE EVENTOS VOLCÁNICOS SIMILARES PREVIOS

Los depósitos de flujos piroclásticos son un tipo común en la secuencia eruptiva del volcán Arenal en los últimos 7000 años. Sin embargo, nos

interesa realizar una comparación con aquellos producidos durante el presente período eruptivo (esto es: de 1968 a la fecha). Una comparación entre los

eventos históricos de los flujos piroclásticos principales se resume en la Tabla 1.

**1968.** El despertar del Arenal después de varias décadas de reposo estuvo acompañado de una serie de explosiones entre los días 28 y 31 de julio. Dicha erupción fue compleja, tanto en su variedad de mecanismos de transporte, como en los depósitos volcánicos (caída, balística, oleadas, flujos) y su grado de alcance. Una serie de al menos 5 capas de niveles pumíceos y escoriáceos fueron depositados, seguidos por oleadas y flujos piroclásticos (Alvarado *et al.*, 1997a). Sin embargo, en nuestro caso particular, nos interesa mencionar la generación de flujos piroclásticos del tipo bloques y cenizas en el sentido estricto, los cuales estuvieron restringidos al valle del río Tabacón así como a los flancos occidentales del volcán (Melson y Sáenz, 1968). Al parecer estos fueron, junto con las oleadas, las fases tardías de la erupción, posiblemente correspondientes al día 31 de julio. Los depósitos del río Tabacón fueron cubiertos por las coladas de lava subsecuentes, por lo que su estudio actual no puede realizarse; los del flanco occidental consisten en 5 unidades de flujos de bloques y cenizas de poca distribución.

**1975.** Entre los días 17 y 21 de junio de 1975 se generaron varias avalanchas o

flujos piroclásticos que descendieron por el valle del Tabacón hasta una distancia de 4 km, en donde quemaron la vegetación dada su temperatura elevada (Matumoto y Umaña, 1976; Van der Bilt *et al.*, 1976). En ese tiempo, en que la represa de Sangregado se estaba construyendo, personal del ICE fue evacuado dado el peligro y por la precipitación elevada de cenizas.

**1993.** En la noche del 28 de agosto de 1993 (9 p.m.) un deslizamiento incandescente se formó en los flancos NW y W del volcán, y una lluvia de lodo (cenizas mezcladas con gotículas de las nubes) cayó en el lado oeste, incluyendo el área de la presa de Sangregado. La vegetación fue completamente destruida en la parte media del valle de Tabacón. Como consecuencia del deslizamiento, un cráter en forma de herradura se formó en la cima y la avalancha piroclástica se movió ladera abajo desde la cima y fue canalizada por el sistema de drenaje de los valles intracoladas. Se formó un manto en forma de abanico de unos 500 m de ancho, con un rasgo terminal trilobado que se extendió 3 km de la fuente. La temperatura de los bloques de lava debió de ser cercana a los 1000°C y la de la oleada de cenizas acompañante entre 90 y 150°C (Soto *et al.*, 1996). Dicho depósito se extendió hasta 400 m del balneario de Tabacón.

Tabla 1: Comparación entre los parámetros de los principales flujos piroclásticos generados en el Volcán Arenal en los últimos 30 años.

Característica	1968	1975	1993	1998
Tipo de depósito	Flujo de bloques y cenizas (entre otros)	Flujo de bloques, "tortas" de lava y cenizas	Flujo de bloques, "tortas" de lava y cenizas	Flujo de bloques y cenizas
Composición	Monocomposicional pero politextural	Monocomposicional pero politextural	Monocomposicional pero politextural	Monocomposicional y casi monotextural
Volumen (m <sup>3</sup> )	1-2 x 10 <sup>6</sup>	1-2 x 10 <sup>6</sup>	2,2 ± 0,8 x 10 <sup>6</sup>	~5 x 10 <sup>5</sup>
Selección	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre
Estructura	Varias unidades de flujo	Sin estratificación	2 capas en gradación, levées	Sin estructura aparente, levées
Temperatura (°C)	>600	~1000	~1000	≥ 800
Velocidad (km/h)	?	?	40-65	60
Coefficiente fricción equivalente (H/L)	0,22	0,27	0,32	0,46
Lavas post-evento: avance y velocidad	1,5 meses después, 10-30 m/día	700 m primer día, 30 m/día en los 8-9 días después	1000 m primer día, 100 m/día 4 días después	~200 m primer día
Sismicidad premonitoria	Enjambre 3 meses antes	Enjambre 4-5 meses antes	Enjambre 3-4 meses antes	No

1998. Los recientes flujos piroclásticos fueron generados desde el cráter activo del Arenal, producto del derrumbe de parte del borde cratérico incluyendo la parte superior del lago de lava permanente. El depósito se presenta como bloques de lava subangulares, centimétricos a decimétricos, algunas pocas tortas de lava en una matriz de detritos de lava centimétricos hasta tamaño ceniza. Diversas evidencias de campo (árboles quemados, medidas *in situ* de temperatura, presencia de tortas de lava, fumarolas) indican una temperatura elevada al igual que los flujos anteriormente descritos (Tabla 1). Las cenizas producidas por la fragmentación autoclástica y piroclástica fueron expelidas y ascendieron por efecto convectivo (diferencias térmicas)

hasta por lo menos 1,5 km con respecto al cráter y se precipitaron en la cordillera de Tilarán, en un área oblonga que se extiende entre el Arenal y las Juntas de Abangares, ubicada 35 km al SW del volcán.

#### OTROS FLUJOS PIROCLÁSTICOS MENORES

Flujos piroclásticos menores o menos espectaculares han sido reportados en varias ocasiones en el Arenal, tales como las ocurridas en 1987: 18 de marzo (10:05 a.m., a 500 m en el flanco SW), 29 de junio (4:55 p.m, 500 m del cráter), 13 de julio (4:31 p.m, media hectárea de bosque quemado en el sur) y 17 de julio (2:30 p.m.) (SEAN Bull., 1987a, b, c); el 11 de marzo de 1988 (9:53 a.m., 1 km sobre el flanco sur). En

setiembre de 1996 se registraron varios eventos de flujos piroclásticos: los días 11 (9:26 a.m., flanco SW), 29 (5:00 en el flanco norte y 5:20 p.m. sobre el flanco suroeste) y 30 (4:34 p.m. sobre el flanco NW) (GVN, 1996). Sin embargo, es muy probable que la mayoría de ellos hayan

pasado inadvertidos por la población y los turistas en los días lluviosos, nublados o durante la noche. O bien, simplemente no se hayan reportado por falta de conocimiento sobre el fenómeno al momento de ser observado si su magnitud no es significativa.

### COMPARACIÓN

1) A diferencia de los eventos de 1975 y de 1993, en donde al parecer existió una sismicidad premonitora previa (enjambre de temblores de alta frecuencia, incremento en los eventos de baja frecuencia), el evento piroclástico de 1998 no estuvo precedido por sismicidad alguna. Esto se debe sin lugar a dudas a que el evento de 1998 fue tan sólo un deslizamiento de la parte cuspidal y más inestable del cráter activo, y no fue producto de un fenómeno o proceso volcánico endógeno. La sismicidad premonitora de 1968 se diferencia en el hecho de que el volcán poseía varias décadas hasta siglos de inactividad y el conducto estaba cerrado, en contraposición con los años subsiguientes.

2) El depósito piroclástico de 1998 se diferencia de los de 1975 y 1993 en su menor volumen y en el hecho de que sus componentes son más blocosos en

comparación con los precedentes, en los cuales existen gran cantidad de tortas de lava bulbosa. Esto se explica por el hecho de que en los eventos anteriores se derrumbó gran parte del lago de lava cratérico, mientras que en el evento del presente año fue tan sólo una pequeña parte (el borde, tapa o corteza) del lago cratérico.

3) El evento de 1998 se parece *grosso modo* más en el tipo de depósito (flujo de bloques y cenizas) y en su carácter multievento, al de 1968 con la salvedad en su granulometría y volumen significativamente menor. Se diferencia en el hecho de que el de 1968 fue a conducto cerrado, mientras que el de 1998 fue a conducto abierto. No está de más recalcar nuevamente, que el evento de 1968 fue mucho más complejo (diversos tipos de depósitos y de mecanismos de transporte) y de una energía considerablemente mayor.

### IMPLICACIONES

Un detallado estudio de la amenaza volcánica del Arenal fue publicado recientemente por Alvarado *et al.* (1997b) y otro sobre el riesgo y su aspecto social, por Kerle (1996); la simulación de los efectos de una

avalancha volcánica sobre el lago de Arenal fue ampliamente tratada por Hidalgo (1997). En el estudio de Alvarado y sus colaboradores, se concluye que en algún momento en los próximos 200 años se puede desarrollar una intensa

actividad explosiva (tipo pliniano, similar a la del Vesubio en el año 79 d.C.). Las posibilidades son aún mayores para fases subplinianas o freatomagmáticas hasta estrombolianas violentas en las próximas décadas. Este tipo de actividad afectaría principalmente el entorno (unos 7 km), mediante la depositación de rocas piroclásticas (caída, oleadas y flujo), coladas de lava, la generación de lahares y deslizamientos. Los depósitos de caída, afectarían un área mayor con un eje de dispersión orientado preferencialmente hacia Tilarán. Los mapas de amenaza volcánica y su proyección a corto, mediano y largo plazo se muestran en los trabajos citados.

En nuestro caso nos interesa el aspecto relativo a los flujos piroclásticos, tales como los generados en los últimos 30 años. Estos flujos, debido a su alta temperatura, velocidad y momento de inercia, pueden rebasar algunas barreras topográficas, y provocar una devastación considerable. Los peligros son más

elevados a lo largo de los valles por donde se desplaza la masa más consistente y la fracción más gruesa del flujo. De cualquier forma, la nube menos densa de ceniza y gases acompañantes, normalmente a temperatura alta a moderada (<400°C), casi siempre puede causar asfixia y quemaduras en la piel de las personas, así como derribar arbustos.

La presa de Sangregado se encuentra totalmente fuera de la zona de depositación directa de los flujos piroclásticos en los últimos 7000 años (Alvarado *et al.*, 1997b) y de los efectos de una ola (seiche) que se origine por la entrada en el lago de Arenal de un flujo o avalancha de detritos volcánicos (Hidalgo, 1997). Los mayores efectos ante una erupción considerable serían por la caída de materiales volcánicos al embalse, lo que reduciría eventualmente su capacidad útil, por el arrastre de sedimentos a las turbinas y por el efecto de las cenizas en equipos especializados y transformadores.

### CONCLUSIONES

Por causa de la rapidez con la que se desarrollan estos fenómenos, es necesario proceder a la evacuación preventiva de las poblaciones ubicadas en las áreas sujetas de ser alcanzadas por los flujos piroclásticos, esto es: en un radio de 4,5 km con respecto al cráter activo, y preferencialmente de 7 km. Resulta claro que la zona actualmente más peligrosa está comprendida dentro de los límites del Parque Nacional (laderas oeste, sur y norte), pero algunos sectores turísticos como Los Lagos y Tabacón están dentro de la zona de

peligro elevado. Si un flujo como el que aconteció en 1975 ocurriera cuando el volcán está nublado, en plena lluvia o de noche, probablemente las personas no se percatarían del peligro inminente hasta cuando sea muy tarde. Se estima que se requieren unos 4 ó 5 minutos para que estos flujos lleguen a la base del volcán, justo a las partes en donde el turismo o los lugareños se encuentran concentrados. Esto se traduciría en una catástrofe.

Nuestros estudios evidencian que la represa de Sangregado se encuentra fuera de peligro para los flujos piroclásticos del tipo bloques y ceniza.

La gran alarma y crisis creada, fue debida a la espectacularidad del fenómeno, bajo unas condiciones atmosféricas óptimas y ante un despliegue rápido de los medios de comunicación, altamente competitivos entre sí. Aunque dichos flujos piroclásticos no son un fenómeno frecuente en el volcán, al menos en los últimos 30 años se tiene un registro de al menos 12 eventos de este tipo. Muchos otros eventos probablemente no fueron reportados, ya sea porque ocurrieron como fenómenos aislados y de noche o bajo condiciones atmosféricas no aptas,

o porque ocurrieron cuando todavía no había ocurrido la tremenda expansión turística a partir de 1991-92. Tenemos pues, un promedio de un evento al menos cada 2,5 años. Esto tan sólo nos recalca que el Arenal es, lo que todos ya sabemos, un volcán activo y, por ende, con un peligro intrínseco. La pregunta sobre cuánto tiempo podrá mantenerse activo es en extremo difícil de responder. Ejemplos de volcanes andesíticos en el mundo con actividad continua son excepcionales: el volcán Izalco (El Salvador) se mantuvo activo durante 196 años (desde 1770 hasta 1966, y por eso fue conocido como "El Faro del Pacífico") y el Sakurajima (Japón) permanece activo a lo largo de más de cuatro décadas (1955 al presente).

**AGRADECIMIENTOS:** Se agradece la colaboración brindada en diferentes aspectos relacionados a este trabajo, a los Geólogos Fernando Alvarado y Mauricio Mora y a los señores Marco T. Naranjo, Lorenzo Murillo y Luis Madrigal.

#### REFERENCIAS

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, enero de 1994. Resúmenes/Abstracts:52-53.

Alvarado, G.E., Schmincke, H.-U., Soto, G.J., & Sumita, M., 1997a. The 1968 basaltic andesite eruption at Arenal volcano (Costa Rica): Fallout, surge or pyroclastic flow? - Volcanic activity and the environment, IAVCEI General Assembly, Abstracts, Puerto Vallarta, enero 19-24, 1997; p. 82.

Alvarado, G.E., Soto, G.J., Ghigliotti, M. & Frullani, A., 1997b. Peligro volcánico del Arenal. -Bol. OSIVAM, 8 (15-16): 62-82; 1995, San José.

Alvarado, G.E., Taylor, W.D., Ohrnberger, M.M., Soto, G.J. & Madrigal, L., 1997c. 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, 1995; San José.

GVN, 1996. Arenal. Bulletin of the Global Volcanism Network, Smithsonian Institution, Washington, D.C., 21 (9): 15.

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. -Boletín OSIVAM, 8 (15-16): 46-56; 1995, San José.

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, 1993; 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 Geografía e Historia, 5: 299-315.

Melson, W.G. & Sáenz, R., 1968. The 1968 Eruption of Volcán Arenal, Costa Rica: Preliminary summary of field and laboratory studies. -Trad. española: La erupción del Volcán Arenal, Costa Rica en julio de 1968. -Rev. Geogr. América Central, 5-6: 55-148; 1977.

SEAN Bull., 1987a. Arenal. Smithsonian Institution, Washington, D.C., 12 (3): 8.

SEAN Bull. 1987b. Arenal. Smithsonian Institution, Washington, D.C., 12 (7): 4-5.

SEAN Bull. 1987c. Arenal. Smithsonian Institution, Washington, D.C., 12 (8): 8.

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, 1993, San José.

Van der Bilt, H., Paniagua, S. & Ávila, G., 1976. Informe sobre la actividad del Volcán Arenal iniciada el 17 de junio, 1975. -Rev. Geogr. Inst. Panamericano de Geografía e Historia, 5: 295-298.

## CENIZA ERUPTADA POR EL VOLCÁN ARENAL, 1992-1997

### ASH ERUPTED BY ARENAL VOLCANO, 1992-1997

**Gerardo J. Soto**

Oficina de Sismología y Vulcanología, y Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), Instituto Costarricense de Electricidad, Apdo. 10032-1000 San José.

Soto, J.. 1998. Ceniza eruptada por el volcán Arenal, 1992-1997. -Boletín OSIVAM, 10 (19-20): 14-24, 1997; San José.

### RESUMEN

Se calculó la masa de la ceniza caída en los alrededores del Volcán Arenal y la caída en el embalse con base en los datos de una red de colectores de ceniza. Para el sexenio 1992-97, el promedio anual de producción de cenizas fue de 80 000 toneladas. De ellas, 5600 toneladas cayeron en el embalse. El aporte de cenizas representa, en promedio anual, sólo un 1,4% del influjo total de sedimentos al embalse. La producción de lava del Arenal, en masa, fue cerca de 200 veces superior a la producción de cenizas.

Desde que el embalse existe, sólo ha habido un evento volcánico significativo, el 28 de agosto de 1993, el cual confirma que eventos pequeños no sedimentan gran cantidad de cenizas en el lago. Empero, respecto a una erupción como la de 1968, la sedimentación en el lago sería de cerca de  $2 \times 10^5$  Ton., que viene a ser la mitad del tonelaje de sedimentos que entran al embalse en un año promedio. Los pronósticos respecto al comportamiento futuro del volcán nos dicen que una erupción un poco más grande es posible que ocurra entre los siglos XXI y XXII, que se estima podría sedimentar un total del orden de  $10^6$  Ton. El caso máximo posible, por la caída de pómez de una erupción pliniana, que podría ocurrir en el año 2200 d.C., podría sedimentar piroclastos en el embalse en el orden de  $10^7$  Ton.

### ABSTRACT

The total mass of ashfall in the surroundings of Arenal volcano has been calculated, as well the amount of ashfall into the Arenal reservoir. A network of seven ash collectors have been used for this purpose. During the sexenium 1992-97, the annual average of ash production is calculated was 80 000 tons. 5600 tons. fall into the reservoir. The inflow of ashes into the reservoir, in annual average, is only 1,4% of the total sediment inflow. The mass lava production of Arenal, was about 200 times the ash production.

Since the creation of the reservoir, only one significant volcanic event occurred, in August 28, 1993. This kind of minor events do not sediment too much ashes into the reservoir. Nevertheless, an eruption like that of 1968, would sediment into the lake about  $2 \times 10^5$  tons., that is the half of total mass of sediments getting into the reservoir in an average year. Prognostics

respect the future volcano behaviour say that an eruption bigger than 1968 one, is possible to occur between XXI and XXII centuries, and would sediment about  $10^6$  Ton. The maximum possible scenario, a pumice fall during a plinian eruption, which could happen about 2200 A.D., would sediment pyroclasts in the reservoir in the order of  $10^7$  Ton.

## INTRODUCCIÓN

Con el propósito de calcular la masa de la ceniza caída en los alrededores del volcán Arenal, y con ello estimar también la caída en el embalse, se construyó una red de colectores de ceniza alrededor del volcán.

La disposición de la red se hizo con base en el acceso, teniendo en cuenta que las explosiones estrombolianas son pequeñas a moderadas (en otros eventos eruptivos en el pasado, más grandes, la distribución de cenizas ha sido más amplia), y además obedeciendo a la orientación de los vientos predominantes en el área del volcán. Como los vientos alisios soplan todo el año, desde el este, las cenizas se orientan casi exclusivamente hacia el lado occidental. Durante la actual fase eruptiva, sólo en las partes más proximales, a menos de 500 m de distancia del lado este, caen cenizas de manera perceptible, excepto durante el período de huracanes del Caribe (agosto y octubre), cuando cae ceniza muy fina, aislada temporalmente, en los alrededores de La Fortuna.

El primer colector piloto se instaló en 1992, aunque fue destruido por el flujo piroclástico del 28 de agosto de 1993. Se retomó esta posición en marzo de 1994, y se mantuvo como piloto para observar la cantidad de ceniza caída. Luego la red se amplió dos puntos en julio de 1996, se

situaron tres recolectores más en noviembre de ese año. Finalmente se completó la red de siete medidores en marzo de 1997.

Los colectores son muy sencillos: un balde plástico cilíndrico con un diámetro cercano a los 40 cm, para un área de colección que ronde los 600-1000 cm<sup>2</sup>. Los diámetros suelen cambiar, puesto que al haber montado los recolectores en fechas diferentes, o bien al cambiar los baldes cuando se dañan, no siempre es factible obtener baldes del mismo diámetro. Obviamente, se calibra el área de recolección para cada balde en cada sitio. La altura óptima del balde es de unos 50 cm de altura, al asumir una recolección cada mes, de modo, que se prevea hasta 500 mm/mes de lluvia. Por su densidad, la ceniza llovida cae al fondo, aun si el balde tiene agua, o esté casi o totalmente lleno. Cada balde está protegido por un cerco de madera, situado 0,5 m sobre el piso, para evitar que las cenizas y arenas retrabajadas por el viento caigan en el balde y contaminen las muestras.

La recolección se realiza separada por períodos de entre dos y cuatro semanas. Una vez hecha la recolección de las muestras de ceniza, lo cual se practica removiendo ésta a bolsas plásticas con ayuda de agua, para que no queden residuos, se lleva al

laboratorio de Ingeniería Geotécnica, donde se secan por 24 horas a 110° C. Luego se separan granulométricamente y se pesan, y con ello se obtiene la relación peso/(área/tiempo). Posteriormente, se hace un cálculo ponderado por mes para cada punto de recolección, y luego se calcula para la toda la red.

De la muestra, se guarda un

volumen aproximado de 33 cm<sup>3</sup>, para analizarle bajo el microscopio binocular sus características mineralógicas (cristales sueltos, fragmentos de roca, escorias, fragmentos de vidrio, etc.). Un detalle de este tipo, con ayuda del microscopio electrónico, fue realizado para las cenizas recolectas entre mayo y agosto de 1992, y fue publicado por Dellino y Alvarado (1992).

### LA RED Y LOS CÁLCULOS

Los siete puntos de recolección nos dan ventajas estratégicas. Los puntos C y D se encuentran en una línea desde el cráter activo hacia el oeste, en puntos de cómodo acceso por ser los de las casetillas de los inclinómetros secos, con una ubicación topográfica de primer orden. El punto V se encuentra ligeramente desplazado hacia el SW, para cubrir la bisectriz de dispersión de cenizas hacia el occidente, también en un sitio de fácil acceso. No se han establecido puntos más cercanos al volcán, porque se adentran en áreas de alto peligro volcánico, como lo demuestran el hecho de que llegan gran cantidad de lavas, el flujo piroclástico de agosto de 1993, algunas avalanchas de frentes de coladas de lava y, excepcionalmente, pasan rodando

bloques postexplosivos, o caen bombas volcánicas por proyección balística.

El punto de Sangregado hace uso de las ventajas de las instalaciones de la presa, y cubre la dispersión de las cenizas hacia el norte. Jilguero se ubica a la par de la estación hidrometeorológica del ICE, y cubre la dispersión de las cenizas hacia el sur. Castillo se encuentra en el mismo sitio de la estación sismológica Castillo de la red del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), y cubre la dispersión de las cenizas al SW. Finalmente, la estación Chiripa cubre la dispersión distal hacia el oeste, en el mismo sitio donde se encuentra la sede Chiripa del OSIVAM.

**Tabla 1: Ubicación de puntos de recolección de ceniza y de emisión del Volcán Arenal.**

Sitio de recolección	Latitud	Longitud	Altura (m s.n.m.)	Distancia a cráter (km)	Fecha instalación
C	271,5	457,4	735	1,8 al W	23 abr. 92
D	271,5	456,2	600	3,1 al W	30 jul. 96
V	270,7	456,6	620	2,8 al WSW	30 jul. 96
Castillo (CAS)	267,9	454,5	600	6,0 al SW	13 nov. 96
Sangregado (SAN)	273,4	452,7	560	6,9 al WNW	13 nov. 96
Chiripa (CHI)	269,5	436,9	1010	22,5 al WSW	14 nov. 96
Jilguero (JIL)	268,9	457,7	600	3,0 al SW	24 mar. 97

Con base en los siete puntos de los recolectores y el del volcán (coordenadas 271,45 N; 459,3 E; 1650 m s.n.m.) como emisor, que vienen a ser los vértices, se han establecido nueve triángulos (Figura 1). Como se dijo, para cada punto se establece la relación de ceniza caída en las unidades  $g/(m^2/día)$ . Con base en estimaciones de las curvas de extrapolación de ceniza, se ha establecido que en el punto Arenal (esto es: en el cráter) cae la siguiente cantidad: un tercio de la sumatoria de tres veces lo que cae en C, más tres veces lo que cae en V, más cinco veces lo que cae en D. Puesto de manera algebraica:

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

En términos generales, las curvas de ceniza caída (generalmente en espesor) contra distancia al volcán, son de forma exponencial inversa, es decir, a mayor distancia, el decaimiento de la masa o el espesor, es exponencial. Así lo es para los eventos plinianos y estrombolianos relativamente grandes. Las explosiones estrombolianas actuales

del Arenal son medianas a pequeñas o muy pequeñas, de modo que el decaimiento exponencial se da a distancias muy pequeñas. El punto C, el más cercano, está a 1,8 km del cráter activo, y de allí en adelante, alejándose, las curvas de distribución de ceniza se comportan como partes distales, casi de forma lineal descendente. Con base en esto, podemos proponer un supuesto que nos sirva para calcular la ceniza caída. Si obtenemos el promedio aritmético de la ceniza caída en los tres vértices de cada triángulo, siendo una distribución lineal, este promedio es válido para toda el área del triángulo. Como teníamos el dato de  $g/(m^2/día)$ , al multiplicarlo por el área total y por el número de días del mes, tenemos el peso total de la ceniza caída en ese mes en el triángulo. La sumatoria de los nueve triángulos nos da el peso total de ceniza expelido por el volcán. Asumimos que fuera de los triángulos, en un período estromboliano como el actual, no cae ceniza, lo cual, una vez vistos los datos, parece un supuesto con bastante sustento real.

Cuatro de los nueve triángulos

tienen parte de su área contenida en el embalse (Tabla 2). El peso de la ceniza caída en esos triángulo se prorratea con el porcentaje del área de cada triángulo contenida en el lago, y la sumatoria de esas porciones, nos da el peso total de ceniza caída en el embalse por unidad de tiempo.

Tenemos datos de seis puntos de la red desde diciembre de 1996 (Tabla 3), y de la red completa desde abril de 1997. Por lo tanto, los cálculos expresados supra, podemos utilizarlos para el año 1997 en su totalidad, en cálculos de mes a mes (Tabla 4).

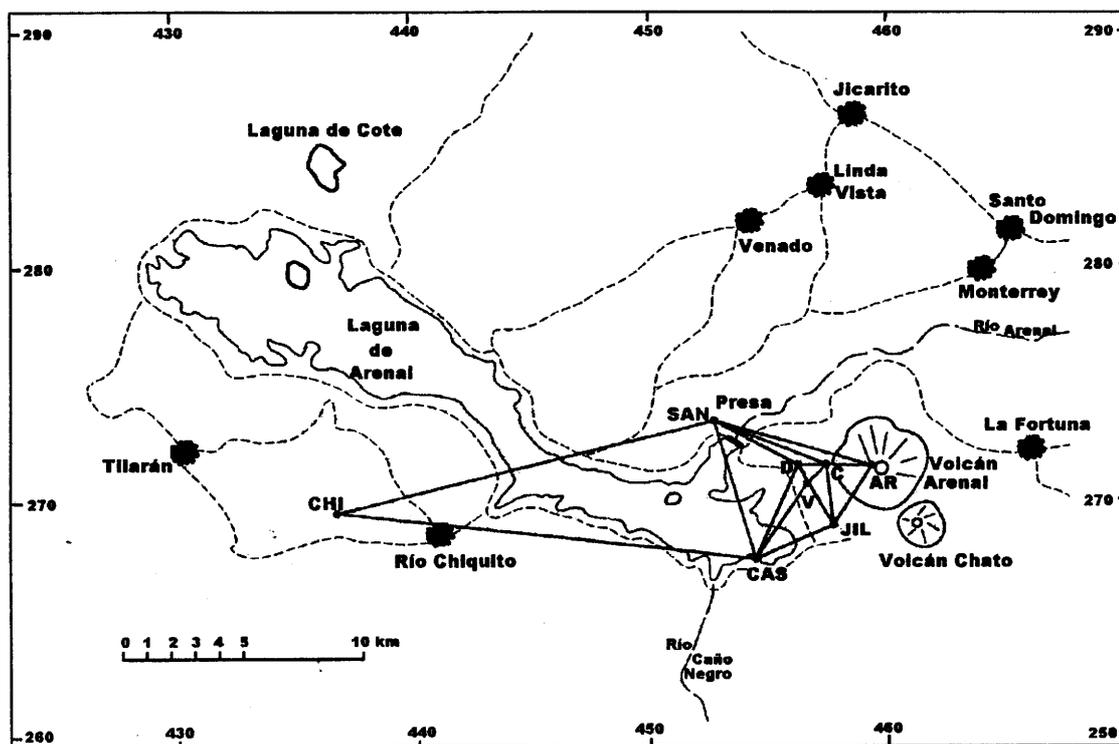


Figura 1: Ubicación de los puntos de muestreo de las cenizas y los triángulos para los cálculos.

En los años precedentes a 1997, no tenemos todos los datos de la red, sino sólo los del recolector en el punto C, que actuaba como un punto piloto. Podemos, no obstante, obtener de una manera indirecta, la masa de ceniza caída en el flanco oeste y en el lago. He puntualizado que los vientos en el Arenal son muy constantes en su dirección, casi siempre soplando hacia el oeste o ligeramente hacia el WSW, por lo que podemos asumir que el punto C se encuentra en una posición que funciona como representativa de toda el área de caída. En efecto, si obviamos las unidades, y dividimos el tonelaje total caído en el flanco oeste entre la cantidad de ceniza caída en el punto C (dada en

$\text{g/m}^2/\text{día}$ ), para cada mes, durante el año 1997, obtenemos una relación de  $340,93 \pm 45,21$  (13,26%). De la misma manera, si dividimos el tonelaje total calculado para todo el flanco oeste, entre el tonelaje calculado que cae en el lago, para cada mes, durante 1997, obtenemos la relación  $14,19 \pm 2,76$  (19,42%). Por lo tanto, si utilizamos los datos de ceniza caída en el punto C, desde 1992 hasta 1996, cuando la red no estaba completa (Tabla 5), y los multiplicamos por la cifra apuntada, tenemos la ceniza caída en ese lapso (Tabla 6), y si luego tomamos estos datos y los multiplicamos por la otra cifra mencionada, tenemos la ceniza caída en el lago en ese período (Tabla 7).

**Tabla 2: Área de los triángulos y porcentaje incluido en el embalse, cenizómetros de Arenal.**

Triángulo	Área (km <sup>2</sup> )	% en embalse	Área en embalse (km <sup>2</sup> )
CHI-CAS-SAN	46,96	46	21,78
SAN-CAS-D	7,92	24	1,90
SAN-D-C	1,14	0	0
D-V-CAS	1,40	10	0,14
D-C-V	0,48	0	0
V-JIL-CAS	3,43	21	0,73
C-V-JIL	1,16	0	0
SAN-C-AR	1,92	0	0
C-JIL-AR	2,47	0	0
Total	68,88	-	26,55

Tabla 3: Ceniza caída (g/m<sup>2</sup>/d) en los recolectores de la Red del volcán Arenal.

Mes	C	D	V	CAS	SAN	CHI	JIL
Agosto 96	47,7	25,0	45,9	-	-	-	-
Setiembre 96	41,7	23,9	36,2	-	-	-	-
Octubre 96	28,9	17,1	35,3	-	-	-	-
Noviembre 96	26,9	15,6	36,0	-	-	-	-
Diciembre 96	25,8	15,5	27,3	1,42	0	0,3	-
Enero 97	24,71	14,7	22,0	0,8	0	0,2	-
Febrero 97	18,8	9,6	42,4	0,1	0	0	-
Marzo 97	22,5	11,7	31,3	0	0	0	-
Abril 97	34,1	18,8	20,7	0	0	0	0
Mayo 97	13,9	7,8	12,9	0,96	0	0	0
Junio 97	48,38	26,33	37,47	0,15	0	0	0
Julio 97	29,36	12,62	42,50	0,17	0,52	0,19	0
Agosto 97	51,75	23,96	53,57	0,08	1,48	0,04	0
Setiembre 97	14,21	6,74	15,39	0,86	0,23	0	0,09
Octubre 97	6,37	2,67	6,62	0,17	0	0	0,17
Noviembre 97	11,45	5,89	8,32	0	0	0	0
Diciembre 97	9,96	4,45	5,95	0	0	0	0
Promedio	26,85	14,25	28,22	0,36	0,17	0,06	0,03

Tabla 4: Cálculo de ceniza caída en el área del volcán Arenal, 1997.

Mes	Masa en flanco Oeste (Ton.)	Volumen DRE* (m <sup>3</sup> )	Masa caída en lago (Ton)
Enero	8784	3514	752
Febrero	8018	3207	546
Marzo	8407	3363	525
Abril	9622	3849	562
Mayo	5166	2066	521
Junio	14559	5823	896
Julio	11166	4466	855
Agosto	17668	7067	1370
Setiembre	5198	2079	534
Octubre	2125	850	159
Noviembre	3302	1321	192
Diciembre	2697	1079	147
Total	96712	38687	7059

\*DRE: En petrología se usa el "equivalente a roca densa" ( $\rho=2,5\text{Ton/m}^3$ ), por sus siglas en inglés.

**Tabla 5: Ceniza caída por mes (g/m<sup>2</sup>/día)  
en el punto C, periodo 1992-97.**

Mes	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Enero	-	18,5	-	7,74	32,9	24,7
Febrero	-	18,5	-	8,24	32,9	18,8
Marzo	-	7,2	-	21,1	41,3	22,5
Abril	-	7,2	14,06	22,7	45,4	34,1
Mayo	14,0	2,0	14,06	31,9	52,6	13,9
Junio	16,0	8,6	8,12	15,4	51,3	48,38
Julio	16,6	9,3	5,96	17,2	35,2	29,36
Agosto	13,6	3,2	4,01	16,5	47,7	51,75
Setiembre	16,7	-	3,64	18,0	41,7	14,21
Octubre	34,8	-	5,16	7,1	28,9	6,37
Noviembre	17,8	-	7,56	24,2	26,9	11,45
Diciembre	16,8	-	7,56	26,7	25,8	9,96

**Tabla 6: Cálculo de la ceniza caída (en Ton.)  
en el flanco oeste del Arenal, 1992-97.**

Mes	1992	1993	1994	1995	1996	1997*
Enero	0	6307	0	2625	11217	8784
Febrero	0	6307	0	2796	11217	8018
Marzo	0	2455	0	7194	14080	8407
Abril	0	2455	4807	7739	15478	9622
Mayo	4773	682	4807	10876	17933	5166
Junio	5455	2932	2762	5250	17490	14559
Julio	5659	3171	2046	5864	12001	11166
Agosto	4637	1091	1364	5625	16262	17668
Setiembre	5694	0	1227	6137	14217	5198
Octubre	11864	0	1773	2421	9853	2125
Noviembre	6069	0	2591	8251	9171	3302
Diciembre	5728	0	2591	9103	8796	2697
<b>Total</b>	<b>49878</b>	<b>25399</b>	<b>23967</b>	<b>73880</b>	<b>157714</b>	<b>96712</b>
<b>Calibrado+</b>	<b>74817</b>	<b>38099</b>	<b>31957</b>	<b>73880</b>	<b>157714</b>	<b>96712</b>

\* Los datos del 97 no surgen del cálculo mencionado, sino de la Tabla 4.

+ Los años 92, 93 y 94 están incompletos, de modo que se han extrapolado con los datos disponibles.

Tabla 7: Cálculo de la ceniza caída (en Ton.)  
en el embalse de Arenal, 1992-97.

Mes	1992	1993	1994	1995	1996	1997*
Enero	0	444	0	185	790	752
Febrero	0	444	0	197	790	546
Marzo	0	173	0	507	992	525
Abril	0	173	339	545	1091	562
Mayo	336	48	339	766	1264	521
Junio	384	207	195	370	1233	896
Julio	399	223	144	413	846	855
Agosto	327	77	96	396	1146	1370
Setiembre	401	0	86	432	1002	534
Octubre	836	0	125	171	694	159
Noviembre	428	0	183	581	646	192
Diciembre	404	0	183	641	620	147
Total	3515	1790	1689	5206	11114	7059
Calibrado+	5273	2685	2252	5206	11114	7059

\* Los datos del 97 no surgen del cálculo mencionado, sino de la Tabla 4.

+ Los años 92, 93 y 94 están incompletos, de modo que se han extrapolado con los datos disponibles.

## DISCUSIÓN

En estos cálculos sólo hemos incluido la producción del volcán en el rubro cenizas. No incluimos la producción de piroclastos gruesos y muy gruesos (>8 mm), esto es, que van desde lapilli hasta los enormes bloques de varias toneladas, todos los cuales caen en la periferia inmediata del cráter activo, y contribuyen a la construcción constante del cono compuesto. El cubicaje de estos productos se torna muy difícil debido al peligroso y tortuoso acceso al área. Las posibilidades se reducen a cálculos con base en fotos aéreas, a través de fotogrametría o por digitalización. Tenemos datos, no obstante, de la producción de lava por el Arenal, en el período 1992-96, que fue de  $49,7 \times 10^6$

$m^3$  (Soto y Arias, 1998). Si asumimos una densidad promedio de  $1,5 \text{ Ton}/m^3$ , que toma en cuenta la porosidad intra e interbloques de las coladas, el peso total sería de unos  $75 \times 10^6 \text{ Ton}$ . Según la Tabla 5, en ese mismo período se produjo cerca de  $0,4 \times 10^6 \text{ Ton}$  de cenizas, de lo que se desprende que la producción de lava, en masa, es cerca de 200 veces superior a la producción de cenizas. En un estudio completo sobre los aportes de sedimento al embalse de Arenal, Sundborg (1996a, p.115) acotaba sobre la actividad volcánica (la traducción libre del inglés es mía): "En la etapa de planeamiento de este proyecto, los efectos de la actividad volcánica fueron mencionados como uno de los

tópicos de estudio. El origen volcánico del sustrato y los suelos se ha puntualizado en el presente reporte, y los efectos de las erupciones individuales del volcán Arenal son claramente visibles en las diferentes capas de cenizas del perfil de suelos... No ha habido una distribución directa importante de material vía aérea desde la última erupción en 1968, la cual dio sólo relativamente pocas cantidades de material de cenizas. Los prospectos para el futuro no pueden ser predichos, y por lo tanto los efectos de las erupciones volcánicas no están incluidos en los cálculos del presupuesto. Sin embargo, las posibles futuras erupciones constituirán un factor de riesgo para el proceso de sedimentación en el reservorio, aun si la frecuencia y magnitud de las futuras erupciones no puede ser predicha." Retomando esas palabras, podemos acotar los comentarios que siguen. Para el sexenio 1992-97, el promedio anual de producción de cenizas determinado en el presente trabajo es de cerca de 80 000 toneladas. De ellas, sólo cerca de 5600 toneladas, en promedio, caen en el embalse. Las recientes investigaciones sobre el aporte de sedimentos al embalse, han estimado que el influjo anual es de 400 000 toneladas (Sundborg, 1996b, p.32). Esto significa que el aporte de cenizas representa, en promedio anual, sólo un 1,4% del influjo total de sedimentos al embalse. Esto confirma la apreciación del investigador en el párrafo anterior. Desde que el embalse existe, sólo hemos tenido un evento relativamente grande, cual fue el del flujo piroclástico del 28 de agosto de 1993 (para detalles véase Soto *et al.*, 1996). En los sedimentos recobrados en

núcleos tomados en el embalse (véase Axelsson, 1996, p.60) se observa un horizonte blanco grisáceo, el cual se interpreta que se sedimentó entre 1990 y 1995. Yo pienso que corresponde con la ceniza fina que se produjo durante el citado flujo piroclástico de 1993, lo cual está acorde con la curva de distribución de cenizas de caída dada por Soto *et al.* (1996, p.22). Esto confirma que eventos de este calibre (pequeños) no sedimentan gran cantidad de cenizas en el lago. Empero, respecto al comentario de Sundborg (1996a, p.115), de que una erupción como la de 1968 no desperdigó mucha ceniza en el área actual del embalse, me he permitido hacer unos cálculos basados en que Melson y Sáenz (1973) calcularon que la ceniza producida durante esa erupción fue de  $3 \pm 1 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Mis estimaciones, basadas en la tabla de distribución de cenizas para esa erupción, dada por Sáenz (1977), indican que el total de ceniza distribuido en lo que hoy sería el lago ha de haber sido de  $3 \times 10^5 \text{ m}^3$ , a lo que habría que sumarle  $0,5 \times 10^5 \text{ m}^3$  de flujos piroclásticos que entraron al área del actual embalse. Al convertirlo en masa, serían cerca de  $2 \times 10^5 \text{ Ton}$ , que viene a ser la mitad del tonelaje de sedimentos que entran al embalse en un año promedio, y por lo tanto, no viene a ser despreciable, como lo sugiere Sundborg en su comentario. Los pronósticos respecto al comportamiento futuro del volcán (verbigracia Alvarado *et al.*, 1997) nos dicen que una erupción un poco más grande es posible que ocurra entre los siglos XXI y XXII, que estimo podría sedimentar en el embalse un total del orden de  $10^6 \text{ Ton}$ . El caso máximo posible, vendría dado por la caída de

pómez de una erupción pliniana, la que podría ocurrir en el año 2200 d.C., y que

podría sedimentar piroclastos en el embalse en el orden de  $10^7$  Ton.

**AGRADECIMIENTOS:** A Francisco Arias quien ha contribuido incondicionalmente durante la instalación de la red de ceniceros, y en la recolección periódica de las cenizas; a Guillermo Arce por confeccionar los protectores de los ceniceros.

## REFERENCIAS

Alvarado, G.E., Soto, G.J., Ghigliotti, M. y Frullani, A., 1997. Peligro volcánico del Arenal. -Boletín OSIVAM, 8 (15-16):62-82, 1995, San José.

Axelsson, V., 1996. Studies of bottom sediments by X-ray radiographic technique. Sediment accumulation. -En: S. Larsson & Å. Sundborg (eds.): The Arenal Reservoir Project. Final Report, AB Hydroconsult, Uppsala, Suecia, pp. 51-66.

Dellino, P. & Alvarado, G.E., 1992. Comentario sobre las cenizas estrombolianas recientes del Volcán Arenal. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 5(9-10): 24-30, 1993, San José.

Melson, W.G. & Sáenz, R., 1973. Volume, Energy and Ciclicity of Eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica. -Bull. Volcanol., 37(3):416-437.

Sáenz, R., 1977. Erupción del Volcán Arenal en el año 1968. -Rev. Geogr. Amér. Central, 5-6:149-188.

Soto, G.J. y Arias, J.F., 1998. Síntesis de la actividad del Volcán Arenal, año 1996. -Boletín OSIVAM, 9 (17-18): 11-18, 1996, San José.

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, 1993, San José.

Sundborg, Å., 1996a. Prediction of the lifetime of the reservoir. -En: S. Larsson & Å. Sundborg (eds.): The Arenal Reservoir Project. Final Report, AB Hydroconsult, Uppsala, Suecia, pp.107-118.

Sundborg, Å., 1996b. Investigations in the drainage basin. -En: S. Larsson & Å. Sundborg (eds.): The Arenal Reservoir Project. Final Report, AB Hydroconsult, Uppsala, Suecia, pp.19-32.

Boletín OSIVAM	1997	Año 10, No. 19 - 20	25 - 34	San José, Costa Rica, julio 1998
----------------	------	---------------------	---------	----------------------------------

## AUSCULTACIÓN SISMOLÓGICA DEL CAMPO GEOTÉRMICO MIRAVALLES Y VOLCÁN ARENAL DURANTE 1997

### SEISMIC MONITORING OF MIRAVALLES GEOTHERMAL FIELD AND ARENAL VOLCANO DURING 1997

Waldo D. Taylor & Rafael Barquero

Oficina de Sismología y Vulcanología, y Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), Instituto Costarricense de Electricidad, Apdo. 10032-1000, Costa Rica.

Taylor, W.D. & Barquero, R.A., 1998. Auscultación sismológica del Campo Geotérmico Miravalles y volcán Arenal durante 1997. -Boletín OSIVAM, 10 (19-20): 25-34, 1997; San José.

#### RESUMEN

Durante el año 1997 se registraron 1672 sismos tectónicos en la red del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), de los cuales 757 corresponden a eventos "regionales" (a más de 25 km de la red) y 915 "locales". Además se grabaron 1174 sismos relacionados con erupciones volcánicas del Arenal y 535 señales de tembor. La actividad en la zona de Miravalles-Tenorio mostró un moderado incremento, registrándose varios enjambres sísmicos, el principal de ellos en los meses de octubre y noviembre. Estos sismos se localizaron principalmente en el flanco SE del macizo del volcán Miravalles, simultáneamente con enjambres en el volcán Tenorio y cerca de la población de Tierras Morenas. En la zona del volcán y lago Arenal se registraron algunos pocos sismos tectónicos pero no relacionados con el volcán, del cual solamente se registraron señales de baja frecuencia asociadas a erupciones volcánicas y tremores.

#### ABSTRACT

During 1997, 1672 tectonic earthquakes were recorded at OSIVAM, from them, 757 correspond to "regional" events (further than 25 km from the network) and 915 are "local". From Arenal volcano signals recorded were: 1174 earthquakes related to eruptions and 535 of tremor. The seismic activity at Miravalles-Tenorio zone showed a moderate increment with several seismic swarms recorded, the most important one occurred in October and November. These earthquakes were located mainly at the SE flank of Miravalles volcano, but other swarms were recorded simultaneously at Tenorio volcano and near the town of Tierras Morenas. At the Arenal volcano and lake area a few tectonic events were recorded, but not related to the volcano, where only low frequency events related to volcanic eruptions and tremor were recorded.

## INTRODUCCIÓN

El campo geotérmico Miravalles y el volcán Arenal cuentan desde 1994, con una red sismológica para llevar el monitoreo continuo de la actividad sísmica que se produzca. Para ello se cuenta con una red de doce estaciones sismológicas y cuatro acelerográficas ubicadas estratégicamente (Tabla 1, Figura 1). La información que registran

dichas estaciones y otras localizadas en el volcán Arenal, es recolectada vía radio en el Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), ubicado en el cerro Chiripa, Quebrada Grande de Tilarán, que es en donde se almacena, procesa y analiza toda la información.

**Tabla 1: Red de estaciones sismológicas del OSIVAM.**

Estación	Código	Latitud	Longitud	Elevación
Colonia	COL	10°39,60	85°12,23	450 m s.n.m.
Mesas	MES	10°44,50	85°11,67	580 m s.n.m.
Cabro Muco	CMU	10°42,95	85°09,15	900 m s.n.m.
Cuipilapa	CUI	10°39,44	85°09,82	600 m s.n.m.
Limonal	LIM	10°42,00	85°15,20	620 m s.n.m.
C. Máquinas	CMA	10°42,30	85°11,60	620 m s.n.m.
Fortuna	FOR	10°28,02	84°40,20	400 m s.n.m.
Monterrey	REY	10°31,63	84°41,93	600 m s.n.m.
Macadamia	MAC	10°29,91	84°46,03	819 m s.n.m.
Banca Lucía	BAL	10°31,21	84°49,94	775 m s.n.m.
Castillo	CAS	10°25,48	84°44,24	600 m s.n.m.
Chiripa	CHI	10°42,30	85°11,60	620 m s.n.m.

Principales objetivos de la Red Sismológica Digital del volcán Arenal y del Campo Geotérmico de Miravalles:

1 Adquisición, procesamiento y análisis de las señales sísmicas (volcánicas y tectónicas), registradas en las estaciones Lennartz en la red del Complejo Geotérmico de Miravalles (CGM) y del Complejo Hidroeléctrico de Arenal (CHA).

2. Cálculo de los parámetros estáticos y

dinámicos de los sismos (magnitud, ubicación y profundidad).

3. Diagramación de epicentros y estadísticas de los temblores utilizando los programas SEISAN, PITSA, GMT y SURFER.

4. Control, mantenimiento y reparación de las estaciones sismológicas y equipos de la red así como de la infraestructura.

5. Análisis espectral, contenido de frecuencias y movimiento de partículas en dos y tres dimensiones, para el análisis de las diferentes señales volcánicas.

6. Análisis del ruido sísmico natural en

todas las estaciones del CGM para determinar los parámetros óptimos de disparo.

Para más detalles técnicos sobre la red de OSIVAM se sugiere consultar Barquero *et al.*, (1994) y la Tabla 1.

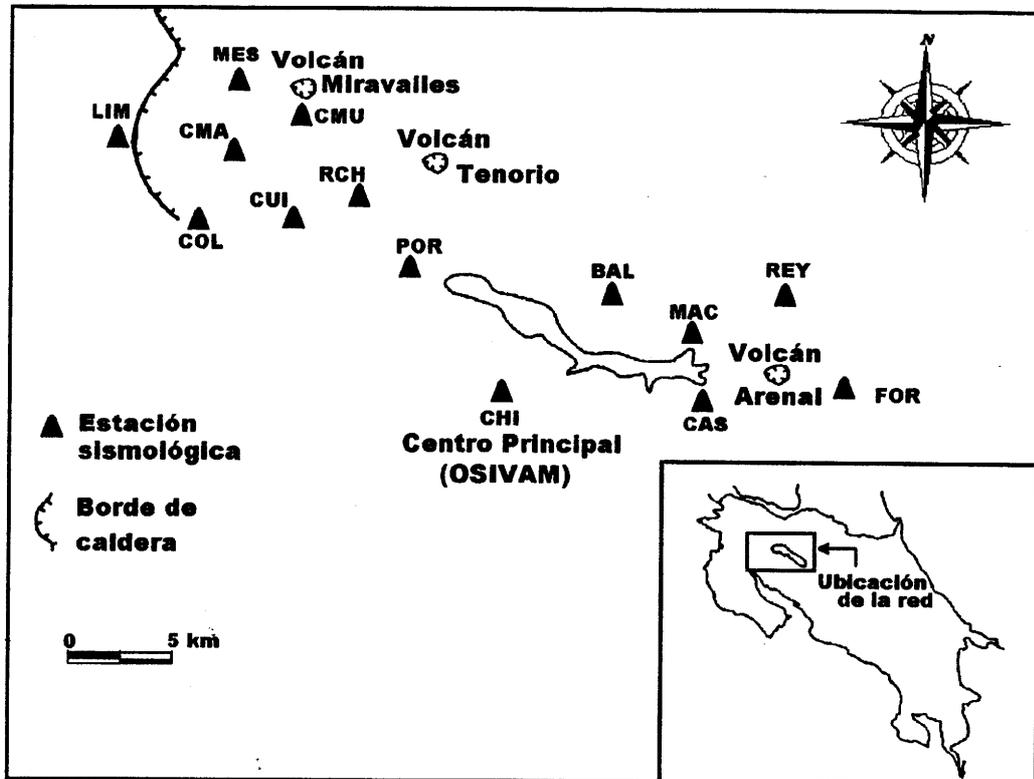


Figura 1: Red de estaciones sísmológicas del OSIVAM.

## RESULTADOS

Durante el período enero-diciembre de 1997, se registraron 1672 sismos tectónicos, de los que 757 corresponden a eventos "regionales" (eventos a más de 25 km de la red) y 915 a eventos "locales" (dentro de un radio de 25 km de la red). Además, se

registraron 1174 erupciones volcánicas y 535 señales de tremor con un total aproximado de 1202 minutos de registro (20 horas). Las tablas 2 y 3 y gráficos 1 y 2 muestran la distribución mensual de eventos tectónicos y volcánicos registrados por ambas redes.

**Tabla 2: Sismos tectónicos registrados por mes en las redes sismológicas digitales del OSIVAM, 1997.**

Mes	Eventos Regionales	Eventos Locales	TOTAL de Registros
Enero	47	30	77
Febrero	28	3	31
Marzo	36	11	47
Abril	63	37	100
Mayo	58	24	82
Junio	86	23	109
Julio	62	70	132
Agosto	86	11	97
Setiembre	91	28	119
Octubre	66	585	651
Noviembre	66	86	152
Diciembre	68	7	75
<b>Total:</b>	<b>757</b>	<b>915</b>	<b>1672</b>

**Tabla 3: Señales registradas por mes en la red sismológica digital volcán Arenal.**

Mes	Total de erupciones	Total de tremores	Minutos de tremor	Total de registros
Enero	186	60	169	246
Febrero	260	99	234	359
Marzo	123	54	120	177
Setiembre	203	115	224	318
Octubre	167	57	128	224
Noviembre	177	125	268	302
Diciembre	58	25	59	83
<b>TOTAL:</b>	<b>1174</b>	<b>535</b>	<b>1202</b>	<b>1709</b>

En la tabla 3 se puede notar que de abril a agosto no hay registros de eventos volcánicos, esto debido a que el disco óptico se encontraba dañado y por falta de espacio en el disco duro, se tomó

la decisión de salvar únicamente los sismos tectónicos. Por lo tanto, no fue posible tener un respaldo digital de los registros volcánicos en OSIVAM, tan solo contándose con el respaldo analógico

con la estación Fortuna (FOR) de la Red Sismológica Nacional.

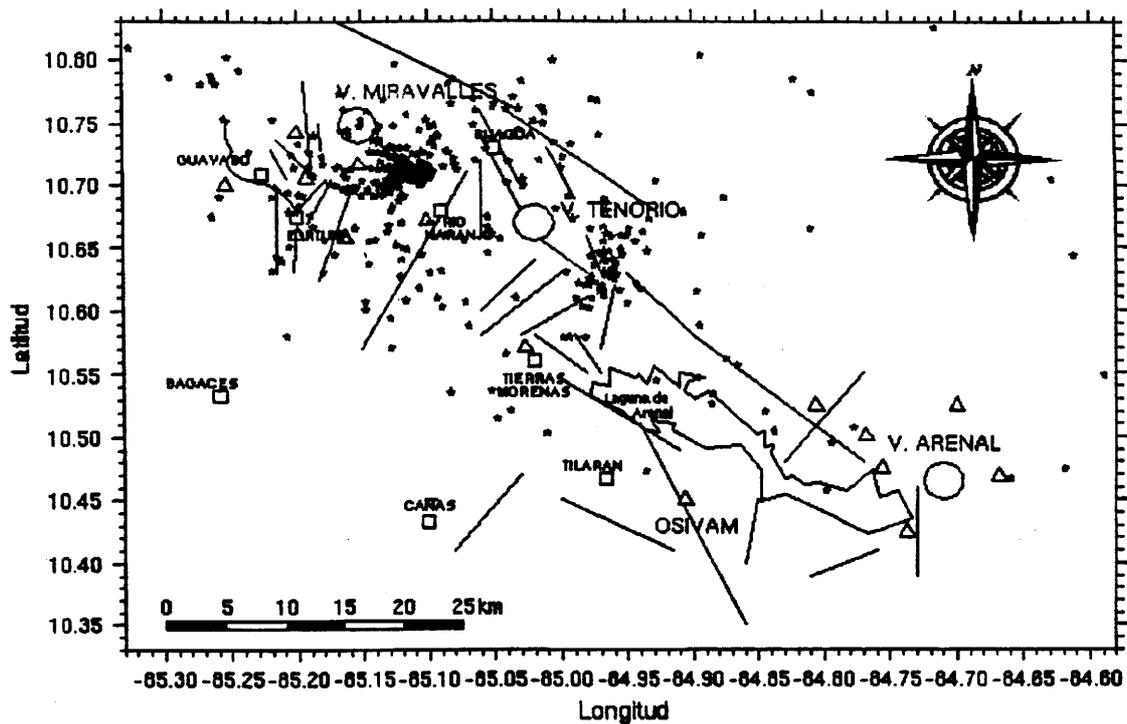
Igualmente, durante el mes de diciembre hay una fuerte disminución en el número de registros obtenidos. Esto obedece a que a partir de ese momento se cambiaron los parámetros de disparo en las estaciones REY, CAS y MAC, con el fin de observar si se podían registrar de mejor manera algunos eventos tectónicos originados en el volcán. Se utilizaron filtros para que el disparo se diere entre los 3 y 12 Hz, pero hasta la fecha no se han observado registros de sismos tectónicos cuyo origen inequívoco sea el volcán Arenal.

Con el programa SEISAN, se realizó la localización de los sismos locales con más de tres estaciones de registro. En la tabla 4 y gráfico 3 y figuras 2, 3 y 4 se presentan los eventos localizados durante el período enero-diciembre de 1997, en tres diferentes áreas. La primera corresponde al área comprendida por las dos redes (Arenal y Miravalles), la segunda tiene un radio de 20 km y la tercera con un radio de 10 km. Estas dos últimas áreas tienen un centro más o menos en la casa de máquinas del Campo Geotérmico de Miravalles.

Tabla 4: Número de sismos mensuales localizados en 1997.

Mes	PGM-ARE	PGM (20 km)	PGM (10 km)
Enero	10	7	2
Febrero	0	0	0
Marzo	4	5	3
Abril	13	7	4
Mayo	15	8	4
Junio	9	8	4
Julio	14	12	9
Agosto	9	7	4
Setiembre	12	3	2
Octubre	251	212	173
Noviembre	47	9	3
Diciembre	1	0	0
<b>Total:</b>	<b>385</b>	<b>278</b>	<b>208</b>

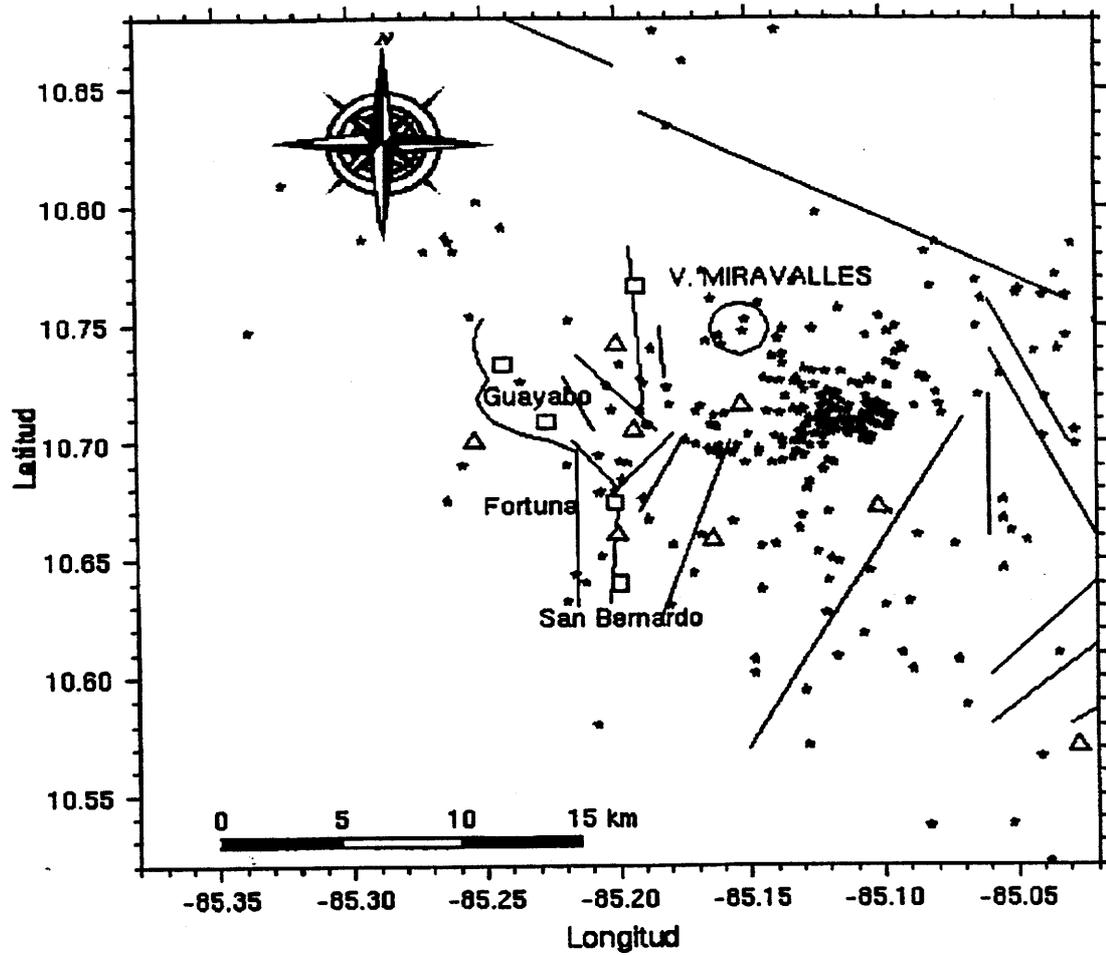
Es importante hacer notar el paulatino retorno de la actividad sísmica en toda el área después de los enjambres sísmicos. Evidentemente, estos obedecieron a un patrón normal de liberación de energía y la estabilización tectónica de la zona. Un estudio más detallado, en proceso, a cargo de la Geól. Ileana Boschini, pretende evaluar mejor ésta crisis sísmica.



**Simbología**

- ★ Sismo
- ▲ Estación sismológica
- Falla
- Población

Figura 2: Mapa de epicentros de las zonas de Miravalles, Tenorio y Arenal. Período enero diciembre de 1997.



**Simbología**

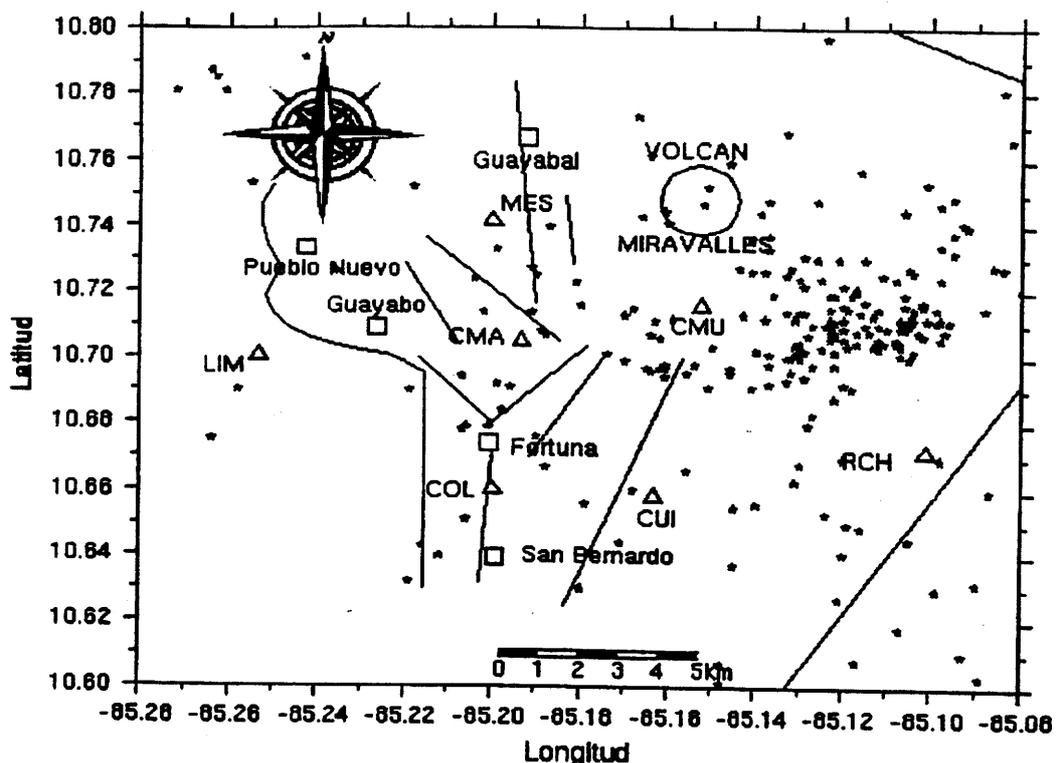
★ Sismo

△ Estación sismológica

— Falla

□ Población

Figura 3: Mapa de epicentros para un área de radio de 20 km alrededor del Campo Geotérmico Miravalles. Período enero-diciembre de 1997.



**Simbología**

- ★ Sismo
- ▲ Estación sismológica
- Falla
- Población

Figura 4: Mapa de epicentros para un área de radio de 10 km alrededor del Campo Geotérmico Miravalles. Período enero-diciembre de 1997.

Durante el período analizado en este trabajo, que abarca todo el año 1997, se puede observar que hubo un incremento importante en la actividad sísmica de la zona de Miravalles en comparación con los años anteriores

(Tabla 5). En esta tabla se consideran solamente los sismos locales dentro de un radio de 10 km de la Casa de Máquinas del Campo Geotérmico de Miravalles y son eventos de profundidades menores a 10 km.

Tabla 5: Número anual de sismos registrados período 1991-1997.

Año	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Sismos	30	48	66	55	44	33	208

## ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA

La actividad sísmica en la zona comprendida dentro de un radio de 10 km con centro en Casa de Máquinas del campo geotérmico (Fig. 4), mostró un moderado incremento durante 1997 con respecto a años anteriores, pero con una mayor concentración de eventos sísmicos en una área al sureste del macizo del volcán Miravalles y fuera de lo que es propiamente el campo geotérmico. Dentro del campo geotérmico hay algunos eventos cuya cantidad no permite determinar claramente posibles alineamientos, pero algunos parecen estar asociados al graben de La Fortuna

y otros a pequeñas fallas localizadas dentro de la caldera de Guayabo. En la zona del lago Arenal se registraron algunos eventos (Fig. 2). En el sector sur cuatro eventos parecen estar asociados a la falla Chiripa y en el sector norte podrían estar relacionados con la falla Cote-Arenal, mientras que al este del volcán Arenal se registraron tres eventos sísmicos con una posible alineación NNE, que se ubican en el mismo sector en donde se produjo un enjambre en 1987; todos estos eventos son de magnitudes pequeñas.

### ENJAMBRE SÍSMICO EN LA FORTUNA DE BAGACES

Durante el mes de julio, las estaciones de la red sísmológica del OSIVAM registraron varios sismos que se localizaron dentro de la caldera de Miravalles, entre 1 y 2 km al norte de la población de La Fortuna de Bagaces, única población en donde se lograron sentir los sismos principales (intensidades máximas de III MM) como los del día 10 y 11 de julio de magnitudes 1,4 y 1,7 y los de los días 21 y 25 de

julio, con magnitudes 1,9 y 1,7. Los eventos de este enjambre presentan una orientación NW-SE que puede relacionarse con una pequeña falla con esa orientación que se localiza en dicho sector del campo (Fig. 4). El mecanismo focal para el evento principal mostró una solución de falla inversa con componente de rumbo. Los sismos presentaron magnitudes máximas de 1,9 y las profundidades oscilaron entre 2 y 5 km.

### ENJAMBRES DE TIERRAS MORENAS, TENORIO Y MIRAVALLES

En el mes de octubre, iniciando con el día 5, las estaciones del OSIVAM comenzaron a registrar una serie de eventos sísmicos originados en tres sitios diferentes: Tierras Morenas, volcán Tenorio y volcán Miravalles. Algunos de estos sismos fueron reportados como sentidos por los vecinos de poblaciones

como Tierras Morenas, Río Chiquito, Río Naranjo, Guayabo y Fortuna de Bagaces (intensidades máximas de III a IV MM). Durante octubre se llegaron a registrar más de 600 eventos en las tres zonas mencionadas, siendo la más activa la de Miravalles. Las profundidades variaron entre 2 y 10 km.

El análisis preliminar realizado para cada una de estas fuentes sísmicas permitió definir posibles fallas o sistemas de fallas que pueden relacionarse con los eventos sísmicos (Figura 2). En la zona de Miravalles se puede notar una distribución de epicentros en forma semicircular a un radio de unos 6 km

desde la cima del volcán Miravalles (Figuras 2 y 3). En el mes de noviembre, luego de una breve pausa de unas tres semanas, la zona de Tierras Morenas volvió a reactivarse, registrándose allí más de 30 eventos. Las otras dos zonas, Tenorio y Miravalles, se mantuvieron en relativa calma durante este período.

### CONCLUSIONES

Durante el año 1997, la red sísmológica del OSIVAM registró un incremento importante en la sismicidad de la región de Miravalles-Tenorio. Afortunadamente, la actividad sísmica se originó en fallas de longitud no muy extensa por lo que no se produjeron magnitudes altas ( $M < 3,0$ ) ni hubo daños materiales que lamentar, solamente se dio una ligera alarma entre la gente de poblaciones vecinas a las fuentes sísmicas. Es importante considerar que los sismos que se registraron en los enjambres de octubre son de carácter tectónico y por su ubicación, no tienen

relación con la explotación del campo geotérmico en Miravalles. Su origen está ligado a la liberación normal de esfuerzos tectónicos regionales en la Cordillera volcánica de Guanacaste. Es necesario continuar con el monitoreo sísmico permanente, para definir si en realidad tenemos sismicidad inducida en el campo geotérmico. En la zona del volcán y lago Arenal se registraron varios eventos de tipo tectónico, pero no relacionados con el volcán, del cual únicamente se registraron señales de baja frecuencia asociadas con erupciones y tremores.

**AGRADECIMIENTOS:** Se agradece la valiosa colaboración de los asistentes Marco T. Naranjo y Dagoberto Boniche en el procesamiento de datos y de José M. Barrantes y Guido Calvo en el mantenimiento de los equipos, así como los comentarios de Ileana Boschini.

### REFERENCIAS

Barquero, R., Barrantes, J.M., Boschini, I., Taylor, W., Alvarado, G. & Climent, A. 1994: Nueva red sísmológica digital Arenal-Miravalles. -Rev. Tecnología ICE: Energía-Telecomunicaciones, 5: 13-22.

**LOS REGISTROS DE TREMORES DEL VOLCÁN ARENAL ENTRE 1994 Y 1997: SU ESTADÍSTICA Y EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL VOLCÁN**

**REGISTORS OF TREMORS OF THE ARENAL VOLCANO BETWEEN 1994 AND 1997: STATISTICS AND DYNAMIC BEHAVIOR OF THE VOLCANO**

**Gerardo J. Soto, Waldo D. Taylor & Marco T. Naranjo**

Oficina de Sismología y Vulcanología, y Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM), Instituto Costarricense de Electricidad, Apdo. 10032-1000 San José.

Soto, J., Taylor, W. & Naranjo, M., 1998. Los registros de 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.

**RESUMEN**

Entre 1994 y 1997 se registraron y guardaron 1652 tremores del Arenal en los archivos de OSIVAM. La amplitud promedio fue de  $3,983 \times 10^{-5}$  m/s, y la frecuencia promedio fue de 1,86 Hz. Las modas de amplitud y frecuencia estuvieron entre  $1,0-2,0 \times 10^{-5}$  m/s y 1,8 Hz, respectivamente.

En el Arenal, la energía del tremor está restringida a una banda muy angosta de frecuencias, cuyo origen se presume que es una región llena de fluidos dentro del volcán. La columna oscilante de magma rico en gases da salida a la lava, y genera los tremores armónicos, mientras que la exsolución de burbujas produce eventos sísmicos que se repiten indefinidamente, y causa el tremor espasmódico. Con las frecuencias de 2 Hz se puede asociar un conducto de la chimenea un poco obstruido en su salida, que antepone un esfuerzo a la salida de gases y promueve la formación de una burbuja mayor. Al romperse esta barrera superficial las frecuencias bajan a 1 Hz. Este comportamiento es recurrente en el orden de días.

**ABSTRACT**

1652 tremors were recorded and stored in OSIVAM files between 1994-97. The average amplitude was  $3.983 \times 10^{-5}$  m/s, average frequency was 1.86 Hz. The mean amplitude and frequency were between  $1.0-2.0 \times 10^{-5}$  m/s and 1.8 Hz, respectively.

In Arenal, the energy of tremor is restricted to a very narrow band of frequencies, which origin is presumed is a region filled of fluids into the volcano. The oscillating column of gas-rich magma outpours the lava, and generates the harmonic tremors, while the exsolution of bubbles produces seismic events repeated indefinitely, and causes the spasmodic tremor. Frequencies of 2 Hz are associated with an obstructed conduit, that uneasies the magma degassing and promotes bigger bubble formation. Being this barrier broken, frequencies drop to 1 Hz. This behaviour is recurrent in the order of days.

## INTRODUCCIÓN

Hemos recopilado todas las señales correspondientes a tremores del volcán Arenal registradas entre enero de 1994 y diciembre de 1997 en las estaciones del OSIVAM. Se les ha hecho un análisis de amplitud y frecuencia, y esta información se ha introducido en una hoja electrónica como base de datos, con el propósito de obtener promedios mensuales y anuales de ambos parámetros. Además, con base en

hipótesis sobre el mecanismo de origen de los tremores en sistemas volcánicos, y amparados en las observaciones que llevamos del volcán durante los años mencionados, procuramos explicar el significado dinámico del comportamiento del Arenal, así como hipotetizamos cómo poder pronosticar algunas erupciones anómalas -por su gran tamaño relativo- en el futuro. La hoja electrónica de datos está disponible en el OSIVAM.

### ¿QUE Y CÓMO ES EL TREMOR EN EL ARENAL?

El tremor volcánico es una señal sísmica continua que, en el Arenal, puede durar desde decenas de segundos hasta varios minutos o incluso horas (cf. Alvarado *et al.*, 1997). Se puede dividir en *tremor armónico*, que es relativamente monocromático, y en *tremor espasmódico*, que es policromático. El tremor del Arenal ha sido registrado tan lejos como la estación analógica Jicaral (de la Red Sismológica Nacional), a 80 km del volcán, y en la estación Limonal (digital de la red de OSIVAM), a 65 km del Arenal. Para mayores detalles sobre la configuración de la red de OSIVAM y el equipo utilizado, se pueden consultar los trabajos de Barquero *et al.* (1994 y 1997).

La mayor parte de la energía espectral en el tremor espasmódico está desperdigada en la banda entre 1,0 y 3,5 Hz, mientras que en el tremor armónico muestra varios picos importantes. El principal pico espectral puede

encontrarse en el rango de frecuencias de 1,4 a 2,5 Hz, con la mayoría de los valores observados entre 1,7 y 2,1 Hz. Se pueden detectar otros picos principales en los múltiplos del primero, por lo que el segundo pico se sitúa entre 2,7 y 5,0 Hz y el tercero entre 4,1 y 7,6 Hz. En estos casos, la señal del tremor y su espectro asociado son similares en todas las estaciones, lo que indica que la naturaleza cerradamente monocromática de estos tremores armónicos se debe a procesos en la fuente original, y no está influenciada, al menos fuertemente, por efectos de sitio.

Las señales sísmicas del Arenal son además registradas en la estación analógica Fortuna, cuyo papel se obtiene por partida doble, en la sede de San José de la Oficina de Sismología y Vulcanología, y en el propio OSIVAM, en Chiripa. Un detalle de la cantidad promedio de horas diarias de tremor entre 1994-96 se da en la Tabla 1.

**Tabla 1: Promedio de horas diarias de tremor por año registrada en la estación Fortuna, Volcán Arenal, 1994-1996**

Año	Horas de tremor
1994	2
1995	5,6
1996	7,2
Promedio 1994-96	4,9

### ESTADÍSTICA Y METODOLOGÍA

Entre enero de 1994 y diciembre de 1997, se registraron, seleccionaron y guardaron 1652 tremores del Arenal. De cada uno de ellos se obtuvo la amplitud máxima, se le practicó un análisis de frecuencias, se agruparon mensualmente, y se obtuvieron promedios mensuales de amplitud y frecuencia (Tabla 2).

Un análisis estadístico de las 1652 señales nos dice que la amplitud promedio es de  $3,983 \times 10^{-5}$  m/s, mientras que la frecuencia promedio es de 1,86 Hz. Las modas de amplitud y frecuencia son entre  $1,0-2,0 \times 10^{-5}$  m/s y 1,8 Hz, respectivamente (Tabla 3).

Tabla 2: Promedio mensual de amplitud y frecuencia de los tremores del Volcán Arenal.

Mes y año	Amplitud promedio (m/s)	Frecuencia promedio (Hz)	Número de eventos
1-94	$1,176 \times 10^{-5}$	203	6
2-94 a 5-94	N.D.	N.D.	N.D.
6-94	$1,016 \times 10^{-5}$	174	22
7-94	$3,086 \times 10^{-5}$	159	12
8-94	$1,640 \times 10^{-5}$	144	7
9-94	$1,770 \times 10^{-5}$	156	24
10-94	$8,634 \times 10^{-6}$	177	31
11-94	$1,050 \times 10^{-5}$	189	7
12-94	$2,208 \times 10^{-5}$	236	23
1-95	$1,975 \times 10^{-5}$	174	30
2-95	$1,604 \times 10^{-5}$	165	83
3-95	$4,954 \times 10^{-5}$	185	111
4-95	$6,230 \times 10^{-5}$	195	68
5-95	$4,815 \times 10^{-5}$	209	143
6-95	$5,341 \times 10^{-5}$	184	94
7-95	$7,052 \times 10^{-5}$	201	66
8-95 a 6-96	N.D.	N.D.	N.D.
7-96	$2,465 \times 10^{-5}$	240	43
8-96	$1,921 \times 10^{-5}$	212	58
9-96	$2,512 \times 10^{-5}$	192	104
10-96	$3,066 \times 10^{-5}$	181	48
11-96	$3,667 \times 10^{-5}$	174	158
12-96	$6,657 \times 10^{-5}$	183	47
01-97	$8,652 \times 10^{-5}$	186	58
02-97	$4,517 \times 10^{-5}$	182	91
03-97	$4,390 \times 10^{-5}$	186	42
04-97 a 08-97	N.D.	N.D.	N.D.
09-97	$3,179 \times 10^{-5}$	184	104
10-97	$2,175 \times 10^{-5}$	191	58
11-97	$2,200 \times 10^{-5}$	163	93
12-97	$2,683 \times 10^{-5}$	159	21
TOTAL	$3,983 \times 10^{-5}$	186	1652

N.D.: No determinado. Se debe a problemas técnicos de diversa índole en la red.

Tabla 3: Distribución grupal de las frecuencias y amplitudes de los tremores del Arenal, 1994-97.

f (Hz)	Númer	%	A (m/s)	Número	%
0,8 - 0,9	3	18	$< 1,0 \times 10^{-6}$	3	18
1,0 - 1,1	55	334	$1,0 \times 10^{-6} \leq A < 2,0 \times 10^{-6}$	7	43
1,2 - 1,3	74	449	$2,0 \times 10^{-6} \leq A < 3,0 \times 10^{-6}$	15	92
1,4 - 1,5	193	1172	$3,0 \times 10^{-6} \leq A < 4,0 \times 10^{-6}$	28	171
1,6 - 1,7	398	2417	$4,0 \times 10^{-6} \leq A < 5,0 \times 10^{-6}$	37	226
1,8 - 1,9	383	2326	$5,0 \times 10^{-6} \leq A < 6,0 \times 10^{-6}$	39	238
2,0 - 2,1	161	978	$6,0 \times 10^{-6} \leq A < 7,0 \times 10^{-6}$	33	201
2,2 - 2,3	156	947	$7,0 \times 10^{-6} \leq A < 8,0 \times 10^{-6}$	46	281
2,4 - 2,5	95	577	$8,0 \times 10^{-6} \leq A < 9,0 \times 10^{-6}$	50	305
2,6 - 2,7	53	322	$9,0 \times 10^{-6} \leq A < 1,0 \times 10^{-5}$	45	275
2,8 - 2,9	47	285	$1,0 \times 10^{-5} \leq A < 2,0 \times 10^{-5}$	384	2344
3,0 - 3,1	17	103	$2,0 \times 10^{-5} \leq A < 3,0 \times 10^{-5}$	275	1679
3,2 - 3,3	4	24	$3,0 \times 10^{-5} \leq A < 4,0 \times 10^{-5}$	173	1056
3,4 - 3,5	3	18	$4,0 \times 10^{-5} \leq A < 5,0 \times 10^{-5}$	111	678
3,6 - 3,7	2	12	$5,0 \times 10^{-5} \leq A < 6,0 \times 10^{-5}$	69	421
3,8 - 3,9	1	6	$6,0 \times 10^{-5} \leq A < 7,0 \times 10^{-5}$	59	360
4,0 - 4,9	2	12	$7,0 \times 10^{-5} \leq A < 8,0 \times 10^{-5}$	54	330
Total	1647	100	$8,0 \times 10^{-5} \leq A < 9,0 \times 10^{-5}$	38	232
Aunque el total de señales es 1652, algunas no tienen datos de frecuencia o amplitud, y por eso las sumatorias sólo contabilizan 1647 y 1638, respectivamente.			$9,0 \times 10^{-5} \leq A < 1,0 \times 10^{-4}$	40	244
			$1,0 \times 10^{-4} \leq A < 2,0 \times 10^{-4}$	99	604
			$2,0 \times 10^{-4} \leq A < 3,0 \times 10^{-4}$	25	153
			$3,0 \times 10^{-4} \leq A < 4,0 \times 10^{-4}$	5	31
			$4,0 \times 10^{-4} \leq A < 5,0 \times 10^{-4}$	3	18
			Total	1638	100

## LA GÉNESIS DEL TREMOR

Se han postulado muchos mecanismos posibles para explicar la fuente de los tremores volcánicos. Para volcanes como el Arenal, en donde la energía del tremor producido está restringida a una banda muy angosta de frecuencias, la explicación más plausible es que el resonador es una región llena de fluidos dentro del volcán, ya sea agua subterránea (calentada), magma, gases o una combinación de ellos. El monocromatismo ligeramente complicado por picos y valles, sugiere flujos turbulentos transitorios (cf. Alvarado *et al.*, 1997; y las referencias allí incluidas).

Por otra parte, los tremores son indicadores del comportamiento de la dinámica interna del volcán y analizando los cambios en las frecuencias se puede pensar en lo siguiente: 1) entre menor sea la frecuencia, mayor es la longitud de la chimenea, 2) los cambios de frecuencias están asociados con el estado de la chimenea, o lo que es lo mismo: la reología de sólido-líquido-gas, está variando. Combinando, podemos asumir dos modos básicos de la chimenea, o en otras palabras, de las ondas que se producen dentro de un tubo: a- Uno es cuando existe un lado abierto y el otro cerrado en la chimenea (tapón); b- el otro es cuando los dos lados de la chimenea están abiertos o los dos lados están cerrados.

Primero veamos cómo se comporta el volcán, con base en nuestras observaciones de la última década: una cámara magmática profunda (10-20 km de profundidad), alimenta una chimenea

cilíndrica, que se bifurca posiblemente en diques al llegar cerca de la superficie, pero que llega al cráter como una chimenea cilíndrica. El magma exsuelve gases cerca de la superficie, de modo que se hace más viscoso en su interior, pero con burbujas que crecen de tamaño hacia la salida, en donde hay un lago de lava permanente. Hay un derrame casi continuo de lava, a una tasa promedio de  $\sim 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , con altibajos, en puntos cercanos al borde del cráter. Algunas burbujas llegan sin complicación a la superficie y son liberadas de manera tranquila, como fumarolas o con pequeñas distorsiones de la superficie, sin explosiones. La lava se enfría por radiación térmica al entorno, y forma una coraza casi sólida, sólo rota por gases y magma que llegan por convección. Una exsolución súbita de gases a cierta profundidad, de menos de 1 km (y más específicamente <300 m) produce las explosiones estrombolianas.

Mientras la columna oscilante de magma rico en gases (mezcla saturada de tres fases), da salida a la lava, y genera los tremores armónicos, la exsolución de burbujas produce eventos sísmicos que se repiten indefinidamente, y causa el tremor espasmódico. Con las frecuencias de 2 Hz se puede asociar un conducto de la chimenea un poco obstruido en su salida (una coraza sólida), que antepone un esfuerzo a la salida de gases y promueve la formación de una burbuja mayor. Por ello, con una erupción más grande de lo normal, hace que se rompa esta barrera superficial y en consecuencia, que bajen las

frecuencias a 1 Hz y salga mucho más material, lógicamente debido a que el conducto en la cima se encuentra mucho más despejado. Este comportamiento es recurrente en el orden de días.

Entonces, el aumento de la frecuencia hasta 3 Hz, podría estar relacionado con dos posibles condiciones de la chimenea analizadas: una disminución de la longitud y ancho de la chimenea o la obstrucción de la salida de la chimenea. Como no hay evidencia tectónica de una dilatación de la cámara o conducto magmático (sismos tectónicos), es muy probable que la salida de la chimenea se bloquee (podría ocurrir con un desprendimiento de las paredes internas del cráter o con una solidificación de la lava) y de allí, el aumento en un factor de dos en la frecuencia (de 1,5 Hz a 3,0 Hz). El bloqueo posiblemente obliga a que las

erupciones sean más energéticas. Al quedar la chimenea relativamente limpia (sin tapa), se produce más salida de lava, disminuyen las erupciones y las frecuencia del tremor retorna entre 1,5 y 1,7 Hz, situación que se mantendrá hasta que sea reconstruida la tapa y se produzca una situación contraria, es decir, aumento de la cantidad y amplitud de las erupciones y aumento de la frecuencia. De una manera general, este ha sido el comportamiento observado, al concatenar los registros digitales, con las notas de las giras de campo.

De un modo general y muy simplificado, si la frecuencia del tremor se mantiene alta ( $> 2$  Hz) por varios días, se podría pronosticar una erupción estromboliana mayor que el promedio, en la cual el "tapón" o coraza desarrollado en el lago de lava, volaría, en alguno de los días subsecuentes.

### CONCLUSIONES

Entre enero de 1994 y diciembre de 1997, se registraron y guardaron 1652 tremores del Arenal en los archivos de OSIVAM. El análisis estadístico muestra que la amplitud promedio es de  $3,983 \times 10^{-5}$  m/s, y la frecuencia promedio es de 1,86 Hz. Las modas de amplitud y frecuencia son entre  $1,0-2,0 \times 10^{-5}$  m/s y 1,8 Hz, respectivamente.

En el Arenal, la energía del tremor está restringida a una banda muy angosta de frecuencias, y la explicación más plausible de su origen es que el resonador es una región llena de fluidos dentro del volcán (agua subterránea

calentada, magma, gases o una combinación de ellos). Se sugieren además flujos turbulentos transitorios.

La columna oscilante de magmático en gases da salida a la lava, y genera los tremores armónicos, mientras que la exsolución de burbujas produce eventos sísmicos que se repiten indefinidamente, y causa el tremor espasmódico. Con las frecuencias de 2 Hz se puede asociar un conducto de la chimenea un poco obstruido en su salida (una coraza sólida), que antepone un esfuerzo a la salida de gases y promueve la formación de una burbuja mayor. Por

ello, con una erupción más grande de lo normal, hace que se rompa esta barrera superficial y en consecuencia, que bajen las frecuencias a 1 Hz y salga mucho más material, lógicamente debido a que el conducto en la cima se encuentra mucho más despejado. Este comportamiento es recurrente en el orden de días.

De un modo general y muy simplificado, si la frecuencia del tremor se mantiene alta ( $> 2$  Hz) por varios días, se podría pronosticar una erupción estromboliana mayor que el promedio, en la cual la corteza del lago de lava, volaría, en alguno de los días subsecuentes.

**AGRADECIMIENTOS:** Algunas sugerencias de Matthias Ohrnberger (Universidad de Potsdam) han sido precisas y de gran ayuda.

#### REFERENCIAS

Alvarado, G.E., Taylor, W.D., Ohrnberger, 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, 1995; San José.

Barquero, R., Barrantes, J.M., Boschini, I., Taylor, W.D., Climent, A. & Alvarado, G.E., 1997: La Red Sismológica Digital del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles (OSIVAM). -Bol. OSIVAM, 7(13-14):7-15, 1994; San José.

Barquero, R., Barrantes, J.M., Boschini, I., Taylor, W., Climent, A. & Alvarado, G., 1994: Nueva red sismológica digital Arenal-Miravalles. -Rev. Tecnología-ICE: Energía-Telecomunicaciones, 5 (2): pp.13-22.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DEL VOLCÁN ARENAL Y ALREDEDORES

**Guillermo Alvarado & Ma. Ester Torres**

Oficina de Sismología y Vulcanología, Instituto Costarricense de Electricidad, Apdo. 10032-1000 San José, Costa Rica.

Alvarado G.E. & Torres Ma. E. 1998. Referencias bibliográficas del volcán Arenal y Alrededores.- Boletín OSIVAM, 10 (19-20): 43-63, 1997; San José.

A continuación se presentan las principales referencias bibliográficas que tratan o hacen mención a algún aspecto geológico o vulcanológico de interés sobre el Arenal, actualizado a julio de 1998, esperando que sea de utilidad para las investigaciones.

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.

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

ALVARADO, G.E., 1984. Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica. -Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Univ. Costa Rica; San José, xii + 183 pp.

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 (Informe Interno ICE), 17 pp.

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 (Inf. Interno, ICE) 17 pp.

ALVARADO, G.E., 1985. Consideraciones petrológicas de los estravolcanes de Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 3: 103-129; 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; San José.

- ALVARADO, G.E., 1991. Nuevas evidencias de neotectonismo en los alrededores del graben de Arenal. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 4 (8): 7-10; San José.
- ALVARADO, G.E., 1989. Los volcanes de Costa Rica. -EUNED; San José, xviii + 175 pp.
- ALVARADO, G.E., 1993. Costa Rica: Land of volcanoes. -Edit. Gallo Pinto Press, 184 pp.
- ALVARADO, G.E., 1995. Volcanic monitoring and warning systems in Latin America and case studies from Costa Rica. -En: P. BORMAN (ed.): Regional Int. Training Course on Seismology and Seismic Hazard Assessment, Lecture and exercise notes; II: 367-372, Interner Bericht; Managua, Nicaragua.
- 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; San José.
- ALVARADO, G.E. & MORALES, L.D., 1989. Historia de la Vulcanología en Costa Rica. -En: A. RUIZ et al. (eds.): Historia de la Ciencia y la Tecnología. El avance de una disciplina. Ed. Tecnológica de Costa Rica, 291-314; Cartago.
- ALVARADO, G.E. & SOTO, G.J., 1995. Volcanic eruptions as triggers for geoscientific developmennt in Costa Rica. -INHIGEO Symposium Volcanoes and History, Abstract Volume, p. 62-63.
- ALVARADO, G.E. & SOTO, G.J., 1997. Aspectos petrológicos de las tefras del Arenal a la luz de nuevos datos geoquímicos y cronoestratigráficos. -Bol. OSIVAM, 7 (13-14):58-72, 1994; San José.
- ALVARADO, G.E. & TORRES M.E., 1998. Referencias bibliográficas del volcán Arenal y alrededores. -Bol. OSIVAM, 10 (19-20): 43-64, 1997; San José.
- ALVARADO G.E., PANIAGUA, S. & TEJERA, R., 1980. Mapa del Vulcanismo Plio-Pleistoceno. -Escala 1:700.000 (mapa preliminar), Escuela Centroamericana de Geología, Univ. de Costa Rica, San José.
- ALVARADO, G.E, ARGUÉTA, S. & CORDERO, C., 1988. Interpretación preliminar de las deformaciones asociadas al volcán Arenal (Costa Rica). -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 1 (2): 25-43; San José.
- ALVARADO, G.E, BARQUERO, R. & HIDALGO, G., 1988. Referencias bibliográficas principales sobre el volcán Arenal y áreas vecinas. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 1 (2): 57-67; San José.

- ALVARADO, G.E., BARQUERO, R. & MORALES L.D., 1991. Type of Volcanic Seismicity at Arenal Volcano, Costa Rica. -Workshop on Volcanic Tremor and Magma Flow, Final Report, p. 35; St. Roman, Alemania.
- ALVARADO G.E., BARQUERO, R., BOSCHINI, I., CHIESA, S., & CARR, M.J., 1986. Relación entre la Neotectónica y el Vulcanismo en Costa Rica. -Rev. CIAF., II (1-3): 246-254; Bogotá.
- 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, Setiembre 19-23, 1994, San José, p. 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, enero de 1994. Resúmenes -Abstracts, p. 52-53;
- 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, 1997; San José.
- 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, Inglaterra (Abstract).
- 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; San José.
- ALVARADO, G.E., MATUMOTO, T., BORGIA, A. & BARQUERO, R., 1992. Síntesis geovulcanología 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 cronoestratigráfico de las rocas ígneas de Costa Rica basado en dataciones radiométricas. -J. Earth. Sc. South. Am., 6 (3): 151-168.
- ALVARADO, G.E., BARQUERO, R., BOSCHINI, I., CLIMENT, A., LINDHOLM, C. & TAYLOR, W., 1994. Informe de diagnóstico y de resultados obtenidos por la red Sismológica Digital de Arenal y Miravalles: Período enero-julio 1994. -Informe OSV. 94.5. ICE, 74 pp.

ALVARADO, G.E., TAYLOR, W.D., OHRNBERGER, M.M., SOTO, G.J. & MADRIGAL, L.A., 1995. First observations of volcano seismicity at Arenal Volcano (Costa Rica) using a new three-component seismic digital network. -Informe O.S.V. 95.8, ICE, 41 pp.

ALVARADO, G.E., SCHMINCKE, H.-U., SOTO, G.E. & SUMITA, M., 1997. The 1968 basaltic andesite eruption at Arenal volcano (Costa Rica): Fallout, surge or pyroclastic flow?. -Volcanic activity an the environment, IAVCEI General Assembly, Abstracts, Puerto Vallarta, enero 19-24, 1997; Vallarta, enero 19-24, 1997; p. 82. ▶

ALVARADO, G.E., TAYLOR, W.D., OHRNBERGER, M.M., SOTO, G.J. NARANJO, M.T., BONICHE, D., BARRANTES, J.M. & MADRIGAL, L., 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, enero 19-24, 1997; p. 127.

ALVARADO, G.E., TAYLOR, W.D., OHRNBERGER, 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, 1995, San José.

ALVARADO, G.E., SOTO, G.J., GHIGLIOTTI, M. & FRULLANI, A., 1997. Peligro volcánico del Arenal. -Bol. OSIVAM, 8 (15-16): 62-82, 1995; San José.

ÁVILA, G., 1977. Investigaciones realizadas en las redes sismológicas de los proyectos de Arenal y Geotérmico, para el período diciembre 1976-diciembre 1977. -Inst. Costarricense de Electricidad (ICE), Dpto. Geología (Inf. Interno); San José, iii + 18 pp.

ÁVILA, G., 1978. Investigación y vigilancia del volcán Arenal, Alajuela, Costa Rica. Dpto. Geología (Inf. Interno ICE); San José, 40 pp.

APPEL, H., WÖRNER, G. ALVARADO, G.E. RUNDLE, C. & KUSSMAUL, S., 1994. Age relations in igneous rocks from Costa Rica. -Profil, 7: 63:69; Stuttgart.

AXELSSON, V., 1996. Studies of bottom sediments by X- ray radiographic technique. Sediment accumulation. -En: S. LARSSON & Å. SUNDBORG (eds.): The Arenal Reservoir Project. Final Report, AB Hydroconsult; Uppsala, Suecia, pp 51-66.

BARBOZA, V. & MELSON, W.G, 1990. Correlación entre las señales sísmicas y los sonidos de las erupciones del volcán Arenal. -Bol. de Vulcanología, 21:8-12; Heredia.

BARQUERO, J. (edit.), (1978-1994). Boletín de Vulcanología. -Escuela de Ciencias Geográficas, Nos. 1-19. Univ. Nacional; Heredia.

- BARQUERO, R., 1986. Estudio de la actividad sísmica del volcán Arenal: Período 1968-1985. -Dpto. Geología. (Inf. Interno ICE); San José, 41 pp.
- BARQUERO, R., 1989. Resumen de la actividad del volcán Arenal, período enero-diciembre 1989. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 2 (4): 5-6; San José.
- BARQUERO, R., 1989. Estudio geoquímico preliminar de fuentes termales y frías del volcán Arenal. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 2 (3): 38-55; San José.
- 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: 199-201; Japón.
- 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; San José.
- 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; San José.
- BARQUERO, R. & SOTO, G., 1990. Reporte de la actividad del Volcán Arenal enero-junio 1990. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 3 (5):1-3; San José.
- BARQUERO, R. & SOTO, G., 1990. Informe de la actividad del Volcán Arenal período julio-diciembre 1990. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 3 (6):1-3, 1991; San José.
- BARQUERO, R. & SOTO, G., 1991. Reporte de la actividad del Volcán Arenal, enero-junio 1991. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 4 (7):2-4; San José.
- BARQUERO, R., ALVARADO, G.E. & MATUMOTO, T., 1992. Arenal Volcano (Costa Rica) Premonitory Seismicity. -En: P. GASPARINI, R. SCARPA & K. AKI (eds.): Volcanic Seismology. IAVCEI Proceedings in Volcanology, 3: 84-95; Berlín.
- 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.E., 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.
- BENNETT, F.D. & RACCICHINI, S., 1977. Las erupciones del volcán Arenal, Costa Rica. -Rev. Geogr. Amér. Central, 5-6 (I-II): 7-35; Heredia.
- 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, enero 19-24, 1997, p. 77.
- 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,, enero 19-24, 1997; p. 79.
- BERGOEING, J.P., 1978. La fotografía aérea y su aplicación a la Geomorfología de Costa Rica. -Escuela de Geografía, Univ. Costa Rica, Inst. Geogr. de Costa Rica, 126 pp.
- BIGOT, S., BARQUERO, J. & MALAVASSI, E., 1982. Vigilancia hidrogeoquímica del volcán Arenal. -Bol. Vulcanología, 12 :2-7; Esc. Ciencias Geográficas; Heredia.
- BIGOT, S., & BARQUERO, J., 1986. Estudio hidrogeoquímico del volcán Arenal, contribución a la actividad eruptiva. -Bol., Vulcanología, 17: 7-14; Esc. Ciencias Geográficas; Heredia.
- 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. -Tesis Ph.D., Princeton Univ., 233 pp.
- 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.
- Emplacement Mechanisms and Hazard Implications, IAVCEI Proceeding in Volcanology 2: 208-243.
- BORGIA, A., CASERTANO, L. & CIGOLINI, C., 1982. Double cycle of the NRM during cooling of a lava flow at Arenal volcano, Costa Rica. -Bol. Vulcanología, 14: 83-85, 1985; Heredia.
- BORGIA, A., LINNEMAN, 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: 417.
- 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., CARR, M., MELSON, W., BEARD, J., ALVARADO, G. & STACK, C., 1990. The Tephra sequence of Arenal volcano, Costa Rica. -VII Congreso Geológico de América Central, 19-23 noviembre 1990; Programas y Resúmenes de Ponencias. p. 39; San José.
- BOUDON, G., RANÇON, J.P., TRAINÉAU, H. & KIEFFER, G., 1994. Violent reactivation of a dormant volcanos: The 1968 explosive eruption of Arenal volcano, Costa Rica. -Int. Volcanol. Congr. (IAVCEI), Ankara, Turkía.
- BOUDON, G., RANÇON, J.P., KIEFFER, G. & TRAINÉAU, H., 1996. L' éruption de 1968 du volcan Arenal (Costa Rica): un exemple de réactivation violente d'un volcán en sommeil. -Soc. Geol. France, Volcanisme Actif de L' Amérique Centrale et du Mexique, paris, p.11.
- BRAVO, J., 1982. Geomorfología de la Hoja Fortuna (escala 1:50.000). -Tesis de Licenciatura, Esc. de Ciencias Geográficas, Univ. Nacional, Heredia; Costa Rica, iix + 451 pp.

BOSCHINI, I., 1988. Sismos sentidos en Costa Rica durante el año 1987; Enfoque hacia las grandes obras del ICE. -Dpto. Geología, ICE, San José, 45 pp.

BURBACH, G.V., FROHLICH, C., PENNINGTON, W. D. & MATUMOTO, T., 1984. Seismicity and Tectonics of the Subducted Cocos Plate. -J. Geophy Res., 89 (B9): 7719-7734.

CALEGARI, P., 1987. Caratteristiche chimiche di alcuni livelli esplosivi del vulcano Arenal, Costa Rica. -Tesis, Univ. degli Studi di Milan, Dip. di Scienze della Terra, ii + 68 pp.

CALEGARI, P. & CHIESA, S., 1991. Análisis químicos de los productos de los volcanes Arenal y Chato, Costa Rica: -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 4 (7): 23-32; San José.

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. & STOIBER, R.E., 1977. Geologic setting of some destructive earthquakes in Central America. -Geol. Soc. Am. Bull., 37: 326-337.

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., México, 5 pp.

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 eruptados por el volcán Arenal Costa Rica. Julio de 1968. -Inf. Semestral ene.jun., 1:49-67, San José.

CHAVES, R. & SÁENZ, R., 1970. Efectos de las erupciones recientes del volcán Arenal. -Inf. Semestral, enero-junio 1970 pp. 17-24; San José.

CHEMINÉE, J.L., DELORME, H., BARQUERO, J., AVILA, G., MALAVASSI, E. & GÜNDEL, F., 1981. Algunos aspectos físicos y químicos de la actividad de los volcanes Poás y Arenal. -Bol. Vulcanología, 11: 12-16; Heredia, Costa Rica.

CHIESA, S., 1987. Estudio de las capas piroclásticas (tefras), del volcán Arenal (Costa Rica), con énfasis en la unidad 20. Dpto. Geología (Inf. Interno ICE), San José, 73 pp.

CHIESA, S., 1987. La mayor erupción pliniana del volcán Arenal, Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 6: 25:41; San José.

CHIESA, S., 1987. L' attivita' esplosiva anteriore al 1968 del vulcano Arenal (Costa Rica). -Convenio di Pisa, 21-22 Maggio, 1987, Il Vulcanismo Esplosivo. Aspetti Geochimici, magmatologic e di dinamica eruptiva.

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; San José.

CHIESA, S., 1998. Presencia de xenobiolíticos de nanoplanton calcáreo en tefras plinianas como evidencia de un basamento sedimentario bajo el Arenal. -Bol. OSIVAM, 9 (17-18): 1-4, 1996; San José.

CIGOLINI, C. & BORGIA, A., 1979. Consideraciones sobre la viscosidad de la lava y 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 immiscibility in Arenal Volcano lavas, Costa Rica (Abstract). - Soc. It Min. Petr., Cetraro, Italia.

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. & 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., CASERTANO, L. & BORGIA, A., 1982. Two stage spinel fractionation bearing immiscibility in basaltic andesite: Arenal Volcano Costa Rica. -Bol. Vulcanológico, 14: 81-82, 1985; Heredia.

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.

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, 93-112; San José.

COMISION PARA LA EMERGENCIA DEL VOLCAN ARENAL, MEMORIA, 1969. 67 pp. San José.

DELLINO, P. & ALVARADO, G.E., 1992. Comentario sobre las cenizas estrombolianas recientes del volcán Arenal. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 5 (9-10): 24-30; 1993, San José.

DENGO, G., 1962. Tectonic-igneous sequence in Costa Ric. En: A.E.J. ENGEL, H.L. JAMES & B.F. LEONARD. (eds.). Petrology studies: A volume to honor A.F. Buddington. Geol. Soc. Amer., pp.133-161.

DÓNDOLI, C. DENGO, G., MALAVASSI, V., E. 1968., Mapa geológico de Costa Rica Escala 1:700 000 (compilación). -Direc. Geol. Min. y Petrol.; San José.

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA, 1975. Gráficos geológicos de perforación y planos de inyección sitio de presa Proyecto Arenal. Dirección Ing. Energía, ICE, s.p.; San José.

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA, 1977. Informe Geológico de progreso al 20 de diciembre de 1976 en la construcción del Proyecto de Arenal. Dirección Ing. Energía, ICE, Tomo I, Texto xii + 123 pp., Tomo III, Fotografías 34 pp. Tomo IV Planos s.p., San José.

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

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.

GEOCONSEIL., 1978. Incidencias del sismo del 14 de abril 1973 sobre el Proyecto. -Inf. Interno, ICE; San José. 13 pp.

GEOTERMICA ITALIANA-ICE, 1992. Evaluación del riesgo y monitoreo del Volcán Arenal. -Inf. Final O.T. 92-05; Pisa, 40 pp. +39 figs. + 5 tablas + Anexo.

GEOTERMICA ITALIANA-ICE, 1996. Evaluación de Riesgo y Monitoreo del volcán Arenal. -Informe Final, O.T. 94-06; Pisa, 62 pp. + Anexos A y B + Anexo Fotografico + Planos.

GILL, J.B., 1981. Orogenic Andesites and Plate tectonics. -Springer-Berlang; Berlín, xiv + 390. pp.

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, p. 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, 1993; San José.
- GHIGLIOTTI, M., FRULLANI, A., SOTO, G.J. & ALVARADO, G.E., 1992. Tefroestratigrafía, historia y ciclos eruptivos del volcán Arenal. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 5 (9-10):52-96, 1993, San José.
- GÜENDEL, F., 1978. On the relationship between earth tides and volcanic activity at Arenal Volcano, Costa Rica, -M.Sc. Tesis, Univ. of Texas, 32 pp.
- GÜENDEL, F., 1986: Seismotectonic of Costa Rica: An analitical view of the Sourthern of the Middle America Trench. Ph.D. Tesis, Univ. of California, Santa Cruz. E.U.A; xii + 157 pp.
- GÜENDEL, F. & MALAVASSI, E., 1980. La actividad del volcán Arenal entre los días 15 al 20 de agosto de 1980. -Bol. Vulcanología, 9 :3-4; Heredia.
- HAGERTY., M.T., SCHARTZ, S.Y., PROTTI, J.M., GARCÉS, M. & DIXON, T., 1997. Observations at Costa Rican Volcano Offer Clues to Causes of Eruptions. -EOS 78 (49): 565 570 - 571.
- HAGERTY, M.T. SCHARTZ, S. Y. & PROTTI, J.M. (en prensa). Preliminary analisis of seismic observations at Arenal Volcano. -Volcanology an Seismology.
- HANTKE G., 1976. Arenal. -Bull Volcanic Eruptions, 14: 59-59.
- HERNANDEZ, J. & TOURNON, J., 1978. Analyse chimique des verres volcaniques riches en silice à la microsonde électronique (par utilisation des détecteurs d' energia des rayons X). -C.R. Acad. Sci. Paris D., 287: 1087-1090.
- HERRSTROM, E.A., REAGAN, M.K. & MORRIS, J.D., 1995. 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, 1995; San José.

- ICE, 1972. Datos relacionados con la erupción del volcán Arenal del año 1968. -Anexo 1 de Informe Interno, ICE; 7 pp. + v + 1 mapa, San José.
- 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, 1993; San José.
- KUDO, A.M., CIGOLINI, C., SINGER, B. & HUSLER, J.W., 1985. Crustal xenoliths in recent basaltic andesite flows from Arenal Volcano, Costa Rica. -EOS 66 (46): 1135.
- KUSSMAUL, S. & SPRECHMANN, P., 1982. Estratigrafía de Costa Rica (América Central), II: Unidades Litoestratigráficas Igneas. -V Congreso Latinoamericano de Geología, 1982, Actas, I: 73-19; Buenos Aires, Argentina.
- KUSSMAUL S., PANIAGUA, S. & GAINZA, J., 1982. Recopilación, clasificación e interpretación petroquímica de las ígneas de Costa Rica. -Inf. Sem., julio-dic. Inst. Geogr. Nac., 28:17-79; San José.
- KUSSMAUL, S., TOURNON, J. & ALVARADO, G.E., 1991. Evolución de las rocas plutónicas y volcánicas subalcalinas del Neógeno y Cuaternario de Costa Rica. -Memorias Simposio sobre Magmatismo Andino y su Marco Tectónico, 1: 23-44; Manizales.
- KUSSMAUL, S., TOURNON, J. & ALVARADO G.E., 1994. Evolution of the Neogene to Quaternary igneous rocks of Costa Rica. -Profil, 7:97-123.
- LARSSON, S. & SUNDBORG, A., 1996. The Arenal Reservoir Project. Final Report. AB Hydroconsult, Uppsala, Suecia, v + 132 pp.
- 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; San José.
- LEEMAN, W.P. & CARR, M.J., 1995. Geochemical constraints on subduction processes in the Central American Volcanic Arc: Implications of boron geochemistry. -Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 295: 57-73.
- LEEMAN, W.P., CARR, M.J. & MORRIS, J.D., 1994. Boron geochemistry of the Central American Volcanic Arc: Constraints on the genesis of subduction-related magmas. -Geochimica et Cosmochimica Acta, 58: 149-168.
- LIAW, H.-B., 1981. Seismic velocity modeling from an ensemble of earthquakes. -Ph.D. Tesis, The Univ. Texas at Dallas, xiii + 135 pp.

- 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, 24-27 octubre.
- McCLELLAND, L., SIMKIN, T., SUMMERS, M., NIELSEN, E. & STEIN, T.C., 1989. Global Volcanism 1975-1985. -Prentice-Hall, Inc., vii + 655 pp.
- MADRIGAL, R. & ROJAS, G., 1980. Manual descriptivo del Mapa Geomorfológico de Costa Rica (escala 1.200.000). -SEPSA, Imprenta Nacional; San José, 79 pp.
- MALAVASSI, E., 1979. Geology and Petrology of Arenal Volcano, Costa Rica. - M.Cc. Tesis Univ. of Hawaii, 111 pp.
- MALAVASSI, E., 1980. Cronología de las coladas de lava del volcán Arenal. -Bol. Vulcanología, 9: 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., 1991. Magma sources and crustal processes at the southern terminous of the Central American Volcanic Front. -Ph.D. Tesis, Univ. Santa Cruz, xxii +435 pp.
- MALAVASSI, E. & BARQUERO, J., 1980. Cronología de las coladas de lava del volcán Arenal. -Bol. de Vulcanol. 15:5. Heredia.
- MALAVASSI, E., SAÉNZ, R. & BARQUERO, J., 1982. Excursión al volcán Arenal. -Bol. Vulcanología, 14: 136-148, 1985; Heredia.
- MALAVASSI V., E. & MADRIGAL, R., 1970. Reconocimiento Geológico de la Zona Atlántica de Costa Rica. -Inf. Técn. y Not. Geol., 38: 1-12, Direc. Geol. Min y Petról; San José.
- MARINI, L., GUIDI, M., FERNÁNDEZ, J.F. & BARQUERO, R., 1990 Análisis geoquímicos de las fuentes termales y frías del volcán Arenal. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 3 (6): 9-27, 1991.
- MATUMOTO, T., 1968. Seismological observations at Mt. Arenal and other volcanoes in Costa Rica. -Preliminary report (inérita), 3 pp.
- 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 Electricidad, (ICE), Dpto. Geología. San José, 33 pp.

- 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, 9 pp.
- 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; San José.
- MATUMOTO, T. & UMAÑA, J.E., 1977. Seismic activity at Volcano Arenal, Costa Rica. -EOS Trans. Am. Geopys. Union, 58 - (6): 540.
- MATUMOTO, T., LATHAM, G., OHTAKE, M. & UMAÑA, J., 1976. Seismicity studies in northern Costa Rica. -Trans. Am. Geophys. Union, EOS, 57: 290.
- MATUMOTO, T., OHTAKE, M., LATHAM, G. & UMAÑA, J., 1977. Crustal Structure in Southern Central America. -Bull. Seism. Soc. Am., 67 (1): 121-134.
- METAXIAN, J.P., LESAGE, P., BARQUERO, R. & CREUSOT-EON, A., 1996. Características espectrales de las señales sísmicas y estimación de Vp en la estructura superficial del Volcán Arenal. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 6 (11-12): 23-44, 1993; San José.
- MELSON, W.G., 1978. Arenal Volcano (summary). -En: Arenal Project, March 16, Report 4: 22-44; Inf. Interno ICE.
- MELSON, W.G., 1982. Alternation between acidic and basic magmas in major explosive eruptions of Arenal volcano, Costa Rica. -Bol. Vulcanología, 14: 65-74, 1995; 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 petrological approach to volcano forecasting. -Procced Workshop Volcanic Hazards in California, pp. 99-118.
- MELSON, W.G., 1988. Major Explosive Eruptions of Costa Rica Volcanes: Update for Costa Rican Volcanism Workshop. -Costa Rican Volcanism Workshop, 15-18 noviembre, 1988; Shyland, Virginia, (inedita) 6 pp.
- MELSON, W.G., 1989. Las erupciones del volcán Arenal 1 al 13 de abril de 1989. -Bol. Vulcanología, 20:15-22; Heredia.

- MELSON, W.G. & SÁENZ, R., 1968. The 1968 eruption of Volcan Arenal: preliminary summary of field and laboratory studies. -Smithsonian Center for Short-Lived-Phenomena, Report 7: 35 pp. + 27 figs. -Trad. española: La erupción del Volcán Arenal. Costa Rica en julio de 1968; Rev. Geogr. Amer. Central; 5-6: 55-148, Esc. de Geogr, Univ. Nacional, Heredia, 1977.
- MELSON, W.G. & SÁENZ, R., 1973. Volume, energy and cyclicity of eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica. -Bull. Volcanol., 37-3: 416-437.
- 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., BARQUERO, J.H., SÁENZ, R. & FERNÁNDEZ, E., 1986. Erupciones explosivas de importancia en volcanes de Costa Rica. -Bol. Vulcanol., 16:15-19; Heredia.
- MELSON, W.G., BARQUERO, J., SÁENZ, R., FERNÁNDEZ, E., D'HEARN, T. & JEREZ, D., 1988. Arenal volcano, Costa Rica. Eruption Frequency, Intensity and Types. -Costa Rican volcanism workshop. Nov. 15-18; Skyland, Shenandoa Nat. Park, Virginia, (inédita), 8 pp.
- MERINO Y CORONADO, J., 1968. Resumen de las observaciones hechas sobre la reciente erupción del volcán Arenal. -Inf. Semestral, Inst. Geogr. Nac., jul. - dic., II:13-17; San José.
- MINAKAMI, T., UTIBORI, S. & HIRAGA, S., 1969. The 1968 Eruption of Volcano Arenal, Costa Rica. -Bull. Earth. Res. Inst., 47: 783-802.
- MIYAMURA, S., 1980. Sismicidad de Costa Rica. -Ed. Univ. Costa Rica; San José, 190 pp.
- MONTERO, W., 1984. Informe sismológico del volcán Arenal, período de junio a agosto de 1984. Dpto. Geología (Informe Interno ICE); San José; 22 pp. +figs.
- MONTERO, W., 1986. Períodos de recurrencia y tipos de secuencias sísmicas de los temblores interplaca en la región de Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 5: 35-72; San José.
- MORA, M., 1998. Análisis espectral del tremor armónico del volcán Arenal (Costa Rica) y modelización de su fuente. -Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Univ. Costa Rica, xiii +115 pp.
- MORA, S., 1983. Una revisión y actualización de la clasificación morfotectónica de Costa Rica, según la teoría de la tectónica de placas. -Bol. Vulcanología, 13: 18-36; Heredia.

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 1:500 000. -Primer Congr. Nac. sobre Desastres Naturales, Univ. Nacional; Heredia.

MORALES, L.D., 1985. Las zonas sísmicas de Costa Rica y alrededores. -Rev. Geol. Amér. Central, 3: 69-101; San José.

MORALES, L.D., SOLEY, J.F., ALVARADO, G.E., BORGIA, A. & SOTO, G., 1980. Análisis espectral de algunas señales sísmicas y su relación con la actividad de los volcanes Arenal y Póas, Costa Rica. -Bol. Obs. Arenal, 1 (2): 1-25; San José.

MUELLER, M., 1984. The Silencio Stratigraphic Sequence (Appendix A en Melson, 1984). -Vínculos, 10: (1-2): 51-55.

OBANDO, L.G. 1986. Estratigrafía de la formación vendado y rocas sobreyacentes (Mioceno-Reciente), provincia de Alajuela, Costa Rica. -Rev. Geol. Amér. Central, 5: 73-104; San José.

PANIAGUA, S., COSILLO, A., MORA, O., SANCHEZ, L. ESQUIVEL, L., SOTO, G., ALVARADO, G.E. & ARRENDO, 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.

PERALDO, G., 1995. Actividad histórica del Volcán Arenal. -Reflexiones, 40:3-15.

PLAFKER, G., 1973. Field reconnaissance of the effects of the earthquake of April 13, 1973, near Laguna de Arenal, Costa Rica. -Bull. Seism. Soc. Am., 63: 1847-1856.

QUIRÓS, T., 1954. Geografía de Costa Rica. Ministerio de Obras Públicas y Transportes e Inst. Geogr. de Costa Rica, VII, 190 pp.

REAGAN, M.K., 1988. U- Series Equilibrium and Disequilibrium in Plagioclase Fron Arenal Volcano, Costa Rica. -EOS, 69 (44): 1509.

REAGAN, M.K., GILL, J.B., MALAVASSI, E. & GARCIA, 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.

- ROTHERY, D., OPPENHEIMER, C. & GLAZE, L., 1990. Combining Landsat TM infrared data with an air photograph of an eruption of Volcán Arenal (6 February 1986). -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 3 (6): 4-8, 1991; San Jose.
- 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, 1993; San José.
- SAÉNZ, R., 1968. Sobre la erupción y efectos de la actividad reciente del volcán Arenal, julio-agosto de 1968. -Dpto. Geología y Minas; San José.
- SAÉNZ, R., 1971. Aparatos volcánicos y fuentes termales de Costa Rica. -Inf. Técn. Notas Geol; 41:1-16; San José.
- SAÉNZ, R., 1977. Erupción del volcán Arenal en el año 1968. -Rev. Geog. Amér. Central, 5-6 (I-II): 149-188; Heredia.
- SAÉNZ, R. & HANTKE C., 1977. Arenal. -Bull. Volcanic Eruptions., 15: 52-53.
- SALGUERO, M., 1976. Volcanes de Costa Rica. -Ed. Costa Rica, San José, 48 pp.
- SAWDO, R.M. & SIMON, I., 1969. Tiltmeter installation Arenal volcano in Costa Rica. Inf. Arthur D. Little, Inc. Cambridge, E.U.A., 7 pp. (inérita).
- SEAN BULL 1977-1988. -Vol. 2-13; Washigton D.C.
- SHEETS, P.D. & MULLER. M. (eds.) 1984. Investigaciones arqueológicas en la cordillera de Tilarán, Costa Rica 1984. -Vínculos, 10 (1-2): 1-236, 1986; San José.
- SIMKIM, T., 1968. Mt. Arenal volcanic eruption. Costa Rica. 29 July-3 Aug., 1968: Event Chronology. -Smithsonian Center for Short-lived Phenomona.
- SIMKIM, T. & SIEBERT, L., 1994. Volcanoes of the world -Geoscience Press, Smithsonian Inst., x + 349 pp.
- 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, viii + 232 pp.
- SIMON, I., SAWDO, R., SAÉNZ, R. & MELSON, W.G., 1969. Preliminary Results from Tiltmeter Recording at Arenal Volcano, Costa Rica. EOS (Trams. Amer. Geophys Union). 51:440.

SIMON, I., SAWDO, R.M., SAÉNZ, R. & MELSON, W.G. 1970. Preliminary results from tiltmeter recording at Arenal Volcano, Costa Rica. Arthur D. Little. Inc. Cambridge, E.U.A. (inédita), 18 pp.

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: 73-103. Japan Intern. Cooper. Agency, Tokyo, Japón.

SOTO, G.J., 1991. Análisis de inclinometría seca en el Volcán Arenal, 1988-90. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 4 (7): 33-61.

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, 13-17 de diciembre de 1993. Program and Abstracts: 109-111.

SOTO, G.J., 1993. Las lavas de octubre 1991 a octubre 1992 del V. Arenal. -Informe OSV. 93.3, ICE, 12 pp. + 3 figs.

SOTO, G.J., 1996. Problemática de la sismicidad volcánica: ¿Qué sucede y qué registramos? El caso que conozco: El Arenal. -En: BOSCHINI, I. (ed.): Memoria del Primer Taller de Actualización de la Red Sismológica Nacional (RSN:ICE-UCR), 24-25 de setiembre de 1996. Informe O.S.V.96.10. ICE: 24-26 pp.

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

SOTO, G.J., 1997: La actividad del volcán Arenal durante 1995. -Bol. OSIVAM, 8 (15-16): 56-61, 1995, San José.

SOTO, G.J., 1998. Ceniza eruptada por el volcan Arenal, 1992-1997. -Bol. OSIVAM, 10 (19-20): 14-24, 1997; San José.

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, nov. 1989; San José, p. 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, nov. 1990, Programas y Resúmenes de Ponencias, p. 80.

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, enero de 1992, Resúmenes/Abstracts, p.79.

SOTO, G.J. & ARIAS, F., 1998. Síntesis de la actividad del volcán Arenal, año 1996. -Bol. OSIVAM, 9 (17-18): 11 -18, 1996; San José.

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, 1991. -Bol. Obs. Vulc. Arenal, 4 (8): 2-6, 1993.

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; 1993.

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 geovulcanológico. -V Congreso Nacional de Recursos Hídricos, Memoria Técnica: p. 40-50; artículo completo en diskette.

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; San José.

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, 1993; San José.

SOTO, G.J., ALVARADO, G.E. & GHIGLIOTTI, M., 1998. El registro eruptivo de Arenal en el lapso 3000-7000 años antes del presente y nuevas deducciones sobre la edad del volcán. -Bol. OSIVAM, 9 (17-18): 19-49, 1996; San José.

SOTO, G.J., TAYLOR, W.D. & NARANJO, T., 1998. Los registros de tremores del volcán Arenal entre 1994 y 1997: Su estadística y el comportamiento dinámico del volcán. -Bol. OSIVAM., 10 (19-20): 35-42, 1997; San José.

STOIBER R., & CARR. M., 1973. Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America. -Bull. Volcanol., 37: 304-325.

SUNDBORG, Å., 1996. Prediction of the lifetime of the reservoir. -En: S. LARSSON & Å. SUNDBORG (eds.): The Arenal Reservoir Project. Final Report, AB Hydroconsult; Uppsala, Suecia, pp. 107-118.

- SUNDRORG, A., 1996. Investigaciones in thr drainage basin. -En: S. LARSSON & Å SUNDBORG (eds.): The Arenal Reservoir Project Final Report, AB Hydroconsult; Uppsala, Suecia, pp. 19-32.
- TAYLOR, W.D. & BARQUERO, R., 1998. Auscultación sismológica del campo Geotérmico Miravalles y volcán Arenal duranre 1997. -Bol. OSIVAM, 10 (19-29): 25-34; San José.
- THORPE, R.S., FRANCIS. P.W. & MOORBATH, S., 1979. Strontium isotope evidence for petrogenesis of Central American andesites. -Nature, 277: 44-45.
- 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., 1983, 31-62.
- TOURNON, J., 1984. Magmatismes du mesozoique à l'actuel en Amerique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andesites. -Mém. Sc Terre, Univ. Pierre et Marie Curie, 49-84, Tesis doctoral; París, iix +335 pp.
- TOURNON, J. & ALVARADO, G.E., 1977. Carte géologique du Costa Rica-Mapa geológico de Costa Rica. Notice explicative -Folleto explicativo, échalle-escala 1:500 000. -Ed. Tecnológica de Costa Rica, 79 pp.
- TREJOS, 1959. Geografía de Costa Rica. -Imp. Universal, San José, 374 pp.
- UMAÑA, J.E., MAINIERI, A., BRUCE, E., ALFONSO, P., FERÁNDEZ, M., RIVET, J., PAUTRE, A., & EDMOND, R., 1972. Informe geológico de progreso del proyecto Hidroeléctrico de Arenal. -Inst. Costarricense de Electricidad, 40 pp.
- UMAÑA, J.E., MAINIERI, A. & MOJICA, E., 1974. Primer informe de progreso al Proyecto de Arenal. -Dpto. Geología (Informe Interno ICE), vi +100 pp.+ anexos.
- UMAÑA, J.E., GÜENDEL, F. & PAUTRE A., 1979. Contribution d'un barrage dans une zone sismiquement et volcanologiquement active. -Bull. Inter. Assoc. Eng. Geol., 20: 117-120.
- UMAÑA, J.E., MAINIERI, A., ALFONSO, P., DE LA TORRE, P. & LAPORTE, G., 1973. Informe geológico y viabilidad, Proyecto Arenal, Dpto. de Geología, (Inf. Interno ICE).
- VAN DER BILT, H., PANIAGUA, S. & AVILA, G., 1976. Informe sobre la actividad del Volcán Arenal iniciada el 17 de junio, 1975. -Rev. Geof. Inst. Panamericano de Geogr. e Historia, 5: 295-298.

- VAN DER LAAT, R., 1988. Deformaciones asociadas al vulcanismo activo de Costa Rica entre 1981 y 1988. -Costa Rican Volcanism Workshop, Nov. 15-18. 1988, Skyland, Shenandoah Nat. Park, Virginia, 12 pp.
- VARGAS, G., 1985. La sucesión vegetal primaria en una región de vulcanismo reciente en el volcán Arenal y sus alrededores, Costa Rica. -Rev. Biol. Trop., 33 2:171-183: San José.
- 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, San José.
- VARGAS, G., CORTÉS, V. & ZUÑIGA, 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, 1993.
- VILLARI, L., 1984. Vulcano Arenal, Costa Rica. Evaluazione preliminare del rischio. -Istituto Italo Latine Americano (IILA). (Inf. Interno ICE); Roma 9 pp.
- VILLEMANT, B., 1996. Origine du déséquilibre  $^{238}\text{U}$  -  $^{230}\text{Th}$  dans les magmas des zones de subduction: exemple de l'Arenal. -Soc. Geól. France, Volcanisme Actif de L'Amérique Centrale du Mexique, París, p. 10.
- VILLEMANT, B. & BOUDON, G., 1977. The 1968 explosive eruption of Arenal Volcano, Costa Rica: Stratigraphy, vesicularity and geochemistry of the products. -Volcanic activity an the enviroment, IAVCEI General Assembly, Abstracts, Puerto Vallarta, enero 19-24, 1997; p. 156.
- WADGE, G., 1981. The magma budget of Volcan Arenal, Costa Rica from 1968 to 1980. -J. Volc. Geotherm. Res., 19: 281-302.
- WADGE., G., 1982. El campo de flujos de lava 1968-1980 y las tasas de erupción del Magma en el volcán Arenal. -Bol. Vulcanología, Heredia, 14:75-78.
- WAHLER W.A. & ASSOCIATES, 1973. Arenal Hydroelectric Project, Tilaran Earthquake, April 14, 1973. -Wakler & Associates, California (Inf. Interno); San José, 9 pp.
- WAHLER W.A. & ASSOCIATES, 1977. Seismicity and design earthquake-Arenal dam. -Cap. III, pp - III-I-III. (Inf. Interno ICE).
- WALDRON, H., 1968. The 1968 eruption of Arenal volcano, Costa Rica. -Reporte, U.S. Geol. Surv. American Embassy (inédita), San José, 5 pp.

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, enero 19-24, 1997, p. 77.

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; San José.

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.