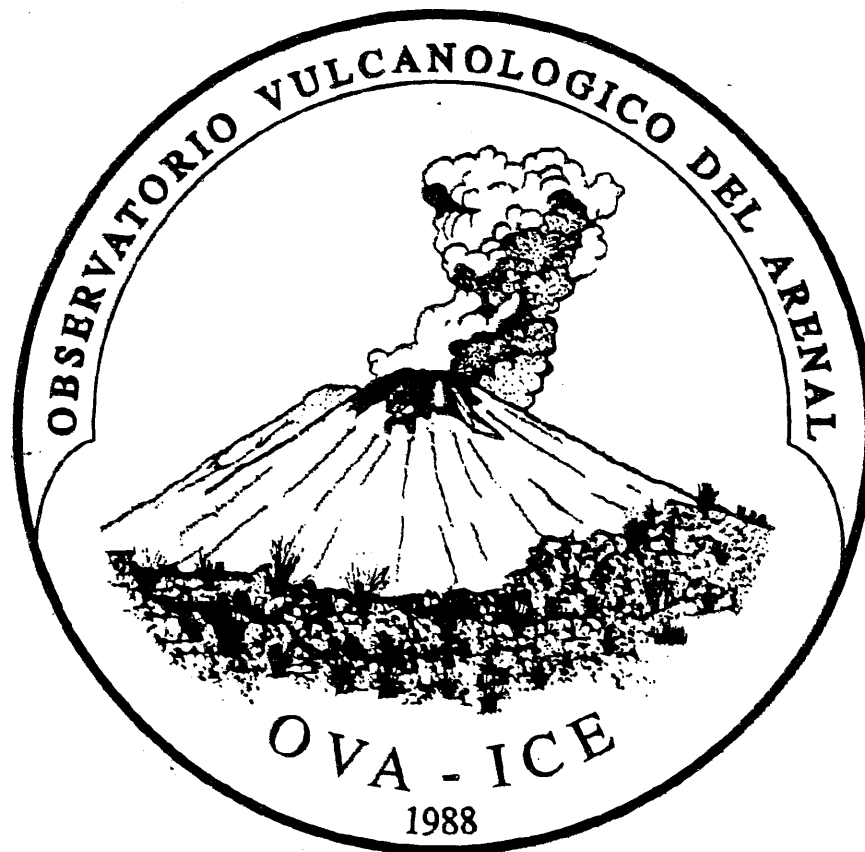


**DIRECCIÓN DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**

BOLETÍN



AÑO 6 No. 11-12, SAN JOSÉ, COSTA RICA

Publicado en noviembre de 1996

ISSN 1015-4396

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD

DIRECCIÓN DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

**BOLETÍN DEL OBSERVATORIO
VULCANOLÓGICO DEL ARENAL**

Editores:

Gerardo J. Soto

Guillermo E. Alvarado

AÑO 6, N° 11-12, diciembre de 1993

San José, Costa Rica

Publicado en noviembre de 1996

ISSN 1015-4396

OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO DEL ARENAL (O.V.A.)*

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

Teléfonos (Telephones): (506)220-7741; 220-7686; 220-7795

Fax: (506)220-8212

El *Observatorio Vulcanológico del Arenal* (O.V.A.) 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 Exploración Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología (Universidad de Costa Rica), constituyen la RED SISMOLOGICA NACIONAL (RSN:ICE-UCR).

The *Arenal Volcanological Observatory* (O.V.A.) 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)*.

INDICE

GERARDO J. SOTO, FRANCISCO ARIAS, GUILLERMO E. ALVARADO, LUIS A. MADRIGAL & RAFAEL BARQUERO Resumen de la actividad del Volcán Arenal durante 1993 5 Summary of Arenal's volcanic activity during 1993 12	
JEAN-PHILIPPE MÉTAXIAN, PHILIPPE LESAGE, RAFAEL BARQUERO & ALAIN CREUSOT-EON Características espectrales de las señales sísmicas y estimación de V_p en la estructura superficial del Volcán Arenal 23	
GERARDO J. SOTO, GUILLERMO E. ALVARADO & LUIS A. MADRIGAL Las posibles erupciones del Volcán Arenal en 1915 y 1922 45	
NORMAN KERLE An economic evaluation and human perspective for a moderate volcanic eruption at Arenal 53	
PETER M. SACHS & GUILLERMO E. ALVARADO Mafic metaigneous lower crust beneath Arenal volcano (Costa Rica): Evidence from xenoliths 71	

Las opiniones vertidas por los autores de los artículos son de su propia y entera responsabilidad, y el O.V.A. no toma necesariamente éstas como su posición oficial.

RESUMEN DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN ARENAL DURANTE 1993

Gerardo J. Soto, Francisco Arias, Guillermo E. Alvarado, Luis A. Madrigal & Rafael Barquero
Oficina de Sismología y Vulcanología, Instituto Costarricense de Electricidad, Apdo. 10032-1000, Costa Rica.

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.

INTRODUCCIÓN

Durante 1993 el Arenal mantuvo su característica actividad exhalativa, estromboliana y efusiva de lavas blocosas. Destacaron los derrumbes de los frentes de lavas, que causaron pequeños flujos calientes de escombros durante el primer semestre, y los eventos de la noche del 28 de agosto, cuando se desprendió parte de la pared WNW del cráter activo y se evacuó el lago de lava, originando una peculiar avalancha piroclástica trilobada, y posteriormente una colada de lava

emitida desde el nuevo anfiteatro creado durante el deslizamiento. La actividad después de este evento fue básicamente efusiva y exhalativa. Se caracterizan además eventos colaterales como la caída de cenizas, la actividad sismovolcánica y la deformación del terreno. No se registraron cambios significativos en los manantiales calientes y fríos alrededor del volcán, durante los muestreos del año.

ACTIVIDAD EXHALATIVA

Las fumarolas cercanas a la cúspide (desde el cráter C, el D y zonas aledañas) continuaron exhalando gases sulfurados, clorurados y vapor de agua durante todo el año, que fueron mayoritariamente orientados hacia el flanco oeste del volcán. El 15 de setiembre, debido a disturbios atmosféricos originados por la tormenta tropical Gert,

cambió la dirección del viento, y los gases fueron barridos hacia los flancos NE y N, y causaron decoloración y quemaduras en el bosque. En diciembre la actividad era bastante vigorosa, principalmente desde un punto cercano al de emisión de la lava, en la parte norte del lago de lava del cráter C.

ACTIVIDAD EXPLOSIVA

Durante el año se caracterizó por explosiones estrombolianas. Éstas eran pequeñas, acompañadas por desgasificaciones menores durante el primer semestre. A finales de junio, se observaron y/o escucharon un promedio de 10 explosiones por día. Basados en la cantidad de ceniza caída y en el tamaño de grano en el flanco oeste (Tabla 1), asumimos que la actividad explosiva decreció notoriamente entre febrero y mayo y se incrementó ligeramente entre junio y julio. En

setiembre, luego del evento del 28 de agosto (ver capítulo aparte), era tenue, caracterizada principalmente por eventos de desgasificación aislados y a veces prolongados por varios minutos, antes que explosiones propiamente, lo cual continuó hasta noviembre. La actividad explosiva aumentó en intensidad y frecuencia en diciembre, registrándose numerosas pequeñas explosiones y emisiones de ceniza en un punto al sur del lago de lava.

TABLA 1: Ceniza recolectada 1,8 km al oeste del cráter activo.

FECHAS	(g/m ²)/día	% > 300 µm	% <300µm
05 dic. 92 - 15 dic. 92	15,3	71,1	28,9
15 dic. 92 - 11 feb. 93	18,5	53,7	43,4
11 feb. 93 - 30 mar. 93	ND	ND	ND
30 mar. 93 - 05 may. 93	7,2	33,2	66,8
05 may. 93 - 02 jun. 93	1,1	0	100
02 jun. 93 - 24 jun. 93	9,0	3,1	96,9
24 jun. 93 - 28 jul. 93	9,9	7,4	92,6
28 jul. 93 - dic. 93	ND	ND	ND

ND: Datos no disponibles.

ACTIVIDAD EFUSIVA

Los dos primeros meses de 1993, la actividad efusiva continuaba como desde finales de 1992 (ver Soto *et al.*, 1993) a través de las coladas de lava activas desde hacía varios meses (Fig. 1). En marzo, el lóbulo suroeste más reciente de la colada activa continuó su avance por un terreno de zacates, hasta la cota aproximada de 750 m, y se

detuvo. Un nuevo obstáculo en el canal de lava alimentador principal, cerca de los 1200 m s.n.m., provocó que los bloques se desbordaran hacia uno y otro lado de la colada, formando dos nuevos lóbulos incipientes, que avanzaron unos 150 m cada uno. Otra colada, hacia el lado SSW, se mantuvo bastante arriba (1400? m s.n.m.), y provocó la caída de

bloques por desprendimiento, debido a la alta pendiente, que llegaban rodando hasta la cota aproximada de 750 m.

Hacia julio, las lavas en el flanco oeste se mantenían activas en varios lóbulos (Fig. 1). Se observaron varios flujos de detritos calientes producidos por el colapso de los frentes de lava, cuyo evento más grande observado fue el 24 de junio a las 14:34 (hora local, HL=GMT-6h) y que produjo una columna de cenizas de 1 km de altura. El flujo avanzó cerca de 750 m desde la cota de 1400 m s.n.m. hasta la de 1000 en el flanco WSW. En junio, cerca de los 1300 m s.n.m. en el lado NW del volcán, se iniciaron pequeños desprendimientos de rocas que fueron aumentando en tamaño y frecuencia, hasta que el 21 de julio se produjo un deslizamiento de unos miles de metros cúbicos que dejó un pequeño anfiteatro en ese lado. A través de esta área salió una pequeña colada de lava a principios de agosto. Los deslizamientos de la pared WNW continuaron en agosto, hasta que finalmente se dio el gran evento del día 28 (ver capítulo siguiente).

El nuevo flujo de lava iniciado el 28 de agosto avanzó a principios de setiembre 50 m

por día, hasta alcanzar la cota de 1000 m s.n.m. (1,5 km del cráter), y luego se dividió en dos lóbulos: uno al WNW que se detuvo en los 800 m de altura, el otro continuó su avance a una tasa máxima de 20-25 m diarios por el valle de Tabacón, hasta que se detuvo el 24 de noviembre, cerca de la cota de 760 m s.n.m.. Una nueva alimentación de lava -sobre el mismo canal- se inició en noviembre en la parte alta del volcán, formando luego varios pequeños lóbulos, pero el principal avanzó por el centro del valle de Tabacón, ubicándose a fines de año en los 650 m s.n.m., para una longitud total de 2,1 km. Una protuberancia, formada por lava y piroclastos se empezó a observar en noviembre, en la salida del canal de lava, en el nuevo anfiteatro del volcán hacia el NW.

El volumen de lava emitido durante el año se puede desglosar de la siguiente manera: $2,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ entre enero y julio, y $6,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ entre agosto y diciembre, lo cual da un total de $9,4 \times 10^6 \text{ m}^3$. Si sumamos el volumen de material juvenil eruptado el 28 de agosto (ver capítulo siguiente), tenemos un total de $11,1 \times 10^6 \text{ m}^3$, muy similar al calculado durante 1992 (Soto *et al.*, 1993; los cálculos incluyen $\pm 20\%$).

LOS EVENTOS DEL 28 DE AGOSTO

De acuerdo con los reportes de testigos, durante la noche del 28 de agosto, un deslizamiento incandescente se formó en los flancos NW y W del volcán, y una "lluvia lodosa" cayó en el lado oeste, incluyendo el área de la presa de Sangregado. Tales aseveraciones, en conjunto con los registros sísmicos, indican que un deslizamiento volcánico se desarrolló después de las 19:50 (hora local) desde la cima del cono activo y duró al menos 50 minutos, registrado en el sismograma como un ruido de alta frecuencia.

Cerca de las 21:00 horas, el deslizamiento incandescente empezó y una fuerte lluvia lodosa se observó en el flanco occidental del volcán. A pesar de que el evento piroclástico mayor duró sólo unos pocos minutos, de acuerdo con los sismogramas y los reportes, la actividad continuó por varias horas, a juzgar por las fotografías tomadas un par de horas después del evento principal. La fuente del evento puede ser establecida como el colapso parcial de una parte del cono cuspidal y el drenado del lago de lava cratérico, aunque no

hubo ninguna explosión volcánica. Sólo un ruido continuo, como el de un motor jet y relámpagos fueron reportados.

La vegetación fue completamente destruida en la parte media del valle de Tabacón, pero no hubo pérdidas humanas o gran daño económico como resultado de esta actividad, sino sólo una persona sufrió quemaduras de segundo grado en uno de sus pies cuando se aventuró a caminar sobre la parte distal de los depósitos, un día después del evento.

Como consecuencia del deslizamiento, un cráter en forma de herradura se formó en la cima (Fig. 2). Una nueva colada de lava fluyó rápidamente sobre el flanco NW (ver capítulo anterior).

Distribución y tipo de los depósitos

Los depósitos de las repetidas caídas de rocas previos al evento principal, estuvieron restringidos a los flancos altos, a menos de 1 km del foco activo. La avalancha piroclástica se movió ladera abajo desde la cima y fue canalizada por el sistema de drenaje de los levés interlávicos. Los depósitos formaron un manto en forma de abanico de unos 500 m de ancho, con un rasgo terminal trilobado que se extendió hasta unos 3 km de la fuente (Fig. 3). Cada lóbulo es de unos 50 a 100 m de ancho y de 1 a 7-10 m de espesor de bloques y masas bulbosas de lava (por su forma, las nominamos "bombas tipo hamburguesa"), circundados por una zona de una oleada dirigida. El depósito blocoso es pobremente granoseleccionado, con masas megabulbosas de lava y megabloques de hasta 7 m de diámetro en medio de una matriz de ceniza y lapilli. Se observan pequeños frentes de flujo definidos y levés (0,5 a 1,5 m de alto) ricos en cuerpos bulbosos de lava, con bombas tipo hamburgueas concentradas y poco material fino. Los canales intralevés contienen

mucha ceniza fina mezclada con grandes bloques densos y masas lávicas bulbosas. Estas masas, petrográficamente idénticas a las lavas eruptadas durante los últimos años, son andesitas basálticas grises con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, olivino y óxidos de Fe-Ti. La mineralogía de la matriz intersticial es idéntica a la de los fenocristales, excepto en que el olivino y ortopiroxeno son raros.

La distribución granulométrica de los fragmentos es fuertemente bimodal con una moda en el rango pluridecimétrico a métrico y la otra en el rango de ceniza a bloques de menos de 20 cm. Ocurren dos facies gradacionales en el depósito de avalancha piroclástica:

- (1) La unidad basal masiva, sin gradación (de 25 a 100 cm de espesor) consiste de bloques juveniles y no juveniles, algunas masas de lava, con contacto grano a grano y una matriz de detritos pobremente granoseleccionada.
- (2) La unidad basal está sobreyacida por bombas y algunos bloques, principalmente formando levés, que alcanza hasta 1,5 m de espesor. Algunas bombas son esféricas, pero la mayoría tienen una forma de hamburguesa, con diámetros que van desde unos decímetros hasta varios metros.

Se depositaron cenizas a lo largo de un eje oeste, que siguió la dirección predominante de los vientos, hasta Tilarán, a 30 km del Arenal, donde cayeron trazas de polvo volcánico (Fig. 4). Un área elongada de 25 km², hasta unos 7 km del frente de los flujos fue cubierta con más de 2 mm de espesor de ceniza fina, y hasta unos 13,5 km de distancia, con 0,5 mm (cerca de 50 km²). A unos 4 km

del volcán (2 km al este del frente de los flujos), se depositó lapilli acrecional (la "lluvia lodosa") de 1 a 3,5 mm de diámetro. El espesor de la capa varía entre 2 y 4 cm, y muestra una gradación inversa seguida por una cruda gradación normal.

Temperatura y velocidad

Considerando las fotografías y los relatos de los testigos, muchos bloques del flujo piroclástico estaban visiblemente incandescentes después de depositados, lo que sugiere una temperatura de cerca de 1000°C, mientras que otros bloques tomados del camino y de las paredes estaban fríos. La temperatura medida en los depósitos era aún alta 17 horas después del evento: 100°C en la superficie, 367°C a 10 cm de profundidad en la matriz, y más de 470°C en las bombas. Varios árboles en contacto directo con las bombas fueron quemados. La temperatura de la oleada lateral y frontal fue estimada entre 90-150°C, basados en botellas plásticas deformadas, que

se encontraron ligeramente fuera del área cubierta por los depósitos.

Una velocidad mínima fue calculada usando la altura escalada por el flujo sobre obstáculos topográficos, en 65 km/h para el lóbulo principal en el valle de Tabacón. La velocidad fue calculada en unos 40 km/h para el lóbulo del flanco oeste del volcán. Esta última velocidad es similar a la de las avalanchas de frentes de colada de lava, que viajaron cerca de 750 m el 24 de junio, calculadas en 40-50 km/h.

Volumen

Con base en los depósitos y la topografía cratérica pre y pos evento, calculamos el volumen de la avalancha piroclástica en $2,2 \pm 0,8 \times 10^6 \text{ m}^3$. Conforme con nuestros cálculos, cerca del 75% del volumen total corresponde con material juvenil previamente contenido en el lago de lava cratérico.

ACTIVIDAD SISMOVOLCÁNICA REGISTRADA

La actividad sismovolcánica se registra en la estación Fortuna, localizada 3,5 km al este del cráter activo (Fig. 1). Se caracterizó principalmente por eventos explosivos, sismos de baja frecuencia y trémores. En la Tabla 2 se consignan el número de eventos explosivos y de baja frecuencia registrados por mes, los promedios mensuales y una extrapolación de la

cantidad de sismos si asumimos un mes completo de registros con el mismo patrón. La cantidad de sismos registrados en octubre y noviembre confirman el carácter menos explosivo del volcán post-erupción del 28 de agosto, y un retorno a su actividad más explosiva en diciembre.

TABLA 2: Sismicidad registrada en la estación Fortuna, 3,5 km al este del cráter activo.

MES	DR	NSR	PDSR	EXTRS
Enero	24	796	33,2	1028
Febrero	26	666	25,6	717
Marzo	17	556	32,7	1014
Abril	26	802	30,9	925
Mayo	ND	ND	ND	ND
Junio	ND	ND	ND	ND
Julio	ND	ND	ND	ND
Agosto	ND	ND	ND	ND
Setiembre	ND	ND	ND	ND
Octubre	29	377	13,0	403
Noviembre	30	230	7,7	230
Diciembre	28	813	29,0	900

DR: Días de registro. NSR: Número de sismos registrados.

PDSR: Promedio diario de sismos registrados.

EXTRS: Extrapolación de sismos con el mes total de registro. ND: Datos no disponibles.

Un enjambre de alta frecuencia (tipo A) fue registrado en la estación sísmica Fortuna (FOR, 3,5 km al este del cráter activo) y en una estación portátil. Se registraron al menos 55 temblores (magnitud < 2) entre el 11 de mayo y el 3 de junio (Tabla 3). La naturaleza de las señales fue variada, lo que sugiere una fuente compleja. Desafortunadamente no fue posible ubicar los sismos, aunque la diferencia

de tiempo de arribo de las ondas P y S (tiempos entre 0,7 y 6,5 s) sugiere una fuente local. Las profundidades focales fueron calculadas empíricamente entre 20 km bajo el edificio volcánico para la mayoría de los primeros eventos y menos de 1 km (cerca o dentro del edificio) para la mayoría de los últimos eventos (Tabla 3).

TABLA 3: Sismos tipo A, Volcán Arenal, mayo - junio de 1993.

PERIODO	PROFUNDIDAD (km)	CANTIDAD
Mayo 11 - Mayo 16	Edificio volcánico	1
	0-5	0
	5-10	6
	>10	13
Mayo 17 - Mayo 21	Edificio volcánico	3
	0-5	3
	5-10	4
	>10	4
Mayo 22 - Junio 3	Edificio volcánico	9
	0-5	5
	5-10	6
	>10	1

Las señales sísmicas registradas durante los eventos del 28 de agosto fueron ya señaladas. Debemos puntualizar que el comportamiento sísmológico del volcán cambió luego de la erupción, debido a una

fuerza abierta, que permitió una casi continua efusión de lavas, con pocas explosiones, resultando en un período de registros predominantes de trémores, hasta diciembre.

DEFORMACIÓN

El flanco oeste del Arenal se ha estado deformando durante varios años, siguiendo un patrón de inclinación dirigido hacia el área del máximo espesor de lavas. Los datos más precisos de deformación se han registrado en la estación C, ubicada 1,8 km al oeste del foco activo. La deformación se inclina hacia el azimut 78° casi constantemente a una tasa de 1,7-2,5 μ rad/mes entre 1986 y 1990 (Soto, 1991). Un patrón similar de deformación fue observado hasta abril de 1992. Desde esa

fecha, una relativa anómala deformación fue registrada, hasta enero de 1993. Entre enero y julio del 93, el volcán se infló, registrado en la estación C como 44 μ rad de inflamamiento hacia el volcán. Debido a que las mediciones no son continuas, sino separadas una de la otra por 184 días, no sabemos exactamente cuándo ocurrió este inflamamiento, que promedia 7,2 μ rad/mes. Si asumimos que el peso de las coladas aún actúa como deformante de fondo, obtenemos un total de inflamamiento de 59 μ rad

(un promedio de 9,7 μ rad/mes) durante ese período, medido en el punto C (Tabla 4). Desafortunadamente, durante los eventos del 28 de agosto, la estación C fue destruida, por lo que no tenemos datos después de julio, para

chequear una deflación posterupción del volcán. Sin embargo, datos de OVSICORI-UNA (GVN Bulletin, 1993) mencionan una deflación de 24 μ rad del cuadrante SW del volcán.

TABLA 4: Deformación del terreno previa a la erupción del 28 de agosto, medida en la estación C, 1,8 km al oeste del volcán.

PERIODO	AZIMUT	μ rad	TOTAL DIAS	μ rad/mes
21abr92 - 15jul92	025°30'	34,75	85	12,3
15jul92 - 04nov92	153°21'	25,96	81	9,6
04nov93 - 11ene93	188°41'	6,89	68	3,0
11ene93 - 14jul93	252°47'	44,07	184	7,2

SUMMARY OF ARENAL'S VOLCANIC ACTIVITY DURING 1993

INTRODUCTION

Arenal activity during 1993 was characterized by summit fumaroles, strombolian explosions and effusion of blocky lavas. There were outstanding events such slides of lava fronts, that produced small hot avalanches during the first half of the year, and the events on August 28 night, when one part of the NW wall of the active crater slid down and then the lava pool was outpoured, forming a peculiar trilobate pyroclastic

avalanche. Soon after a lava flow was emitted from the new-formed horseshoe crater. Afterwards, the activity was basically effusive and fumarolic. Other side events of the volcano activity described here are the ashfall, seismovolcanic activity and ground deformation. No significant changes in hot- and cool-springs located around volcano were detected through several samplings.

FUMAROLIC ACTIVITY

The fumaroles located near the summit (craters C and D and surrounding area) continued their emission of sulfurous and chloride gases and steam all over the year.

These gases were swept out westward by the prevailing winds. On September 15, because atmospheric disturbances due to the tropical storm Gert, the wind direction turned

backwards, and then gases and ash were deposited over the NE and N flanks, causing decoloration and burnt on the forest. In December, fumarolic activity was vigorous,

mainly from a spot close to the lava vent, located on the northern part of the lava pool into crater C.

EXPLOSIVE ACTIVITY

Explosive activity was strombolian. Explosions were small, accompanied by minor degassing shots during the first half of the year. An average of 10 explosions per day were observed and/or heard by the end of June. Based on the amount and grain-size of ash collected in a point 1.8 km W of the active crater (Table 1), we assumed that the explosive activity was weak between February and May, and it increased between June and July.

Explosive activity in September, after the 28 August event (see chapter below) was weak, and mainly isolated and sometimes prolonged (several minutes) degassing events rather than explosions, situation that prevailed until November. In December, explosive activity rose up both in intensity and frequency; numerous small explosions and ash emissions were eyewitnessed right in a point on the southern part of the lava pool.

TABLE 1: Ash collected 1.8 km westward from active vent.

DATES	(g/m ²)/day	% > 300 μm	% <300μm
05 Dec. 92 - 15 Dec. 92	15.3	71.1	2.,9
15 Dec. 92 - 11 Feb. 93	18.5	53.7	43.4
11 Feb. 93 - 30 Mar. 93	NA	NA	NA
30 Mar. 93 - 05 May 93	7.2	33.2	66.8
05 May 93 - 02 Jun. 93	1.1	0	100
02 Jun. 93 - 24 Jun. 93	9.0	3.1	96.9
24 Jun. 93 - 28 Jul. 93	9.9	7.4	92.6
28 Jul. 93 - Dec. 93	NA	NA	NA

NA: Data not available.

EFFUSIVE ACTIVITY

During the first bimester of the year, the lava effusion continued as in late 1992 (see Soto *et al.*, 1993) along the active flows since

several months before (Fig. 1). In March, the most recent SW lobe of the active lobe continued advancing on a grass field, down to

750 m a.s.l. and then stopped. A new obstacle in the main feeding channel (around 1200 m a.s.l.) promoted blocks overflowing the levées, thus forming two new lobes, one each side, advancing some 150 m each. Another lava flow on the SSW higher flank (around 1400 m a.s.l.) was rolling blocks down to 750 m a.s.l.

Until July, lavas on the western flank were still active in several lobes. Several avalanches produced by lava-front collapse had been seen. The biggest eyewitnessed was on June 24, at 14:34 (local time, LT=GMT-6h), which produced an ash cloud about 1 km high. The flow traveled about 750 m from 1400 to 1000 m a.s.l. on west-southwest flank. Other rockslides are supposed in northwestern high flank (about 1300 m a.s.l.), because several changes in the morphology of the cone were seen, increasing both in size and frequency, until the afternoon and evening of 21, when a rockslide (some thousands of cubic meters) was seen coming from the summit area facing to the northwest. A small horseshoe feature was created because that. A small lava flow was pouring out in August from such a small amphitheater. Several more rockslides in west-northwestern high flank were eyewitnessed until August 28, when the big slide event occurred (see following chapter).

Soon after the pyroclastic avalanche of August 28 night occurred, a new blocky-lava flow started pouring out from the new crater opening, advanced 1 km WNWward (1.5 km from the crater) during first 24 hours and then 100 m/day, taking the way to Tabacón valley, to the NW. In early September advanced at a rate of about 50 m/day, until 1000 m a.s.l. (1.5 km from the crater), then it divided in two lobes: one to the WNW which stopped at 800 m a.s.l.; the other continued its advance at a rate of about 20-25 m/day, and ran out on Tabacón valley down to (NW flank of volcano) 760 m a.s.l., when it stopped on November 24. A new lava feeding over the same channel started in November, forming several lobes, the main reaching 650 m a.s.l. (total length of 2.1 km). A lava and pyroclastic knot was observed since November, formed right at the amphitheater gate of the crater.

The total volume of lava effused during the year is as follows: $2,7 \times 10^6$ m³ between January and July, and $6,7 \times 10^6$ m³ between August and December, which totals $9,4 \times 10^6$ m³. If we add the volume of the juvenile material erupted on August 28 (see next chapter), we get a total of $11,1 \times 10^6$ m³, similar to calculated during 1992 (Soto *et al.*, 1993; calculations include $\pm 20\%$).

THE EVENTS OF AUGUST 28

According to eyewitness reports, during the night of August, 28, 1993, an incandescent slide formed on the NW and W flanks of the volcano and "muddy rain" fell on the western side (including the Sangregado dam area). These accounts together with seismic records indicate that a volcanic slide developed after 19:50 (local time) from the active summit cone and lasted at least 50 minutes, high-frequency noise being recorded

on the seismogram. At about 21:00, the main incandescent slide began and a heavy muddy rain shower was seen at the western flank of the volcano. Although the major pyroclastic event lasted only a few minutes according to the seismogram and reports, the activity continued for several hours as judged by photographs, taken a couple hours later. The most significant observation on the 28 August event was that the source of the event could be

so well established as a partial collapse of part of the summit cone and the outpouring of the summit lava pool, yet no volcanic explosion was reported. Only a continuous noise (jet engine-like) and lightning was reported.

The vegetation was completely destroyed in the middle part of the Tabacón valley. No human casualty or large material damage took place as result of the activity, but one curious person suffered second grade burning in his foot when walked on the distal part of the deposits, one day later.

As a consequence of the slide, a horseshoe-like crater formed on the summit (Fig. 2). A new lava flowed rapidly down the NW flank (see previous chapter).

Distribution and type of deposits

The deposits of the repeated rockfalls prior to the main event, were restricted to the upper flanks, less than 1 km away from the active vent. The pyroclastic avalanche moved down the slope from the summit and was channeled by the drainage system of interlava levées. The deposits formed a fan-shaped apron about 500 m wide, with a trilobate terminal feature extending up to 3 km from the vent (Fig. 3). Each lobe being 50 to 100 m wide and 1 to about 7-10 m thick pyroclastic block and bulbous lava lump (hereafter called "hamburger-like bombs") flow deposits, surrounded by a zone of directed surge. The bouldery deposit is massive, poorly sorted, with megabulbous lava lumps and megablocks up to 7 m in diameter set in a matrix formed by ash and lapilli. There is a definite small flow front and levées (0.5-1.5 m high), which show a concentration of megabulbous lava lumps with little fine material. The intralevé channels contain much fine ash mixed with large dense blocks and bulbous lava lumps.

The juvenile bulbous lava lumps, petrographically identical to lavas erupted during the last years, are gray phyric basaltic andesite with ubiquitous phenocrysts of plagioclase, clinopyroxene, orthopyroxene, olivine, and Fe-Ti oxides. The mineralogy of the interstitial groundmass is identical to that of phenocrysts except that olivine and orthopyroxene are rare.

The particle-size distribution is strongly bimodal with one mode in the range of pluridecimeters to meters and the other in the ash, lapilli and small bomb-block range (<20 cm). The pyroclastic avalanche deposit occur in two main gradational facies:

- (1) The massive, nongraded basal unit (25 - 100 cm thick) consists of juvenile and non juvenile blocks, some lava lumps, grain to grain structure, with some poorly sorted debris matrix.
- (2) The basal unit is overlain by bombs and some blocks, principally featuring levées, which reaches up to 1.5 m in thickness. Some bombs are spherical but most have a hamburger-like shape (average diameters increase from some decimeter to <3 m to several meters upwards).

Ash-sized tephra was deposited along a westward axis following the prevailing winds up to 30 km from Arenal, where traces of dust fell on Tilarán town (Fig. 4). An elongated area of 25 km², up to 7 km away from the flow fronts was covered with ≥ 2 mm thick fine ash, and up to 13.5 km away with 0.5 mm (*ca.* 50 km²). At about 4 km west of the volcano (2 km westward from the flow front), 1-3.5 mm diameter accretionary lapilli were deposited (the "muddy rain"). The thickness of the layer varies between 2 and 4 cm, and shows inverse grading followed by a crude normal grading.

Temperature and velocity

Photographs and eyewitness accounts indicate that many blocks of the pyroclastic flow were visibly incandescent after deposited, suggesting a temperature of about 1000°C; others mostly blocks eroded from chutes and flank collapse were cold. The measured temperature of the pyroclastic avalanche deposit was still high 17 hours after the eruption: 100°C at the surface, 367°C at 10 cm depth in the matrix and >470°C in the bombs. The matrix contains abundant shattered wood, suggesting a temperature of about 400°C. Several trees in direct contact to bombs were charred. The lateral and frontal surge temperature was estimated to have been between 90 and 150°C based on deformed plastic bottles found, outside the area covered by the deposit.

A minimum-velocity was calculated using the height climbed by the flow up topographic obstacles, as $V = 65$ km/h for the main lobe at Tabacón valley. Velocity was also calculated in 40 km/h for the lobe on the western flank of the volcano. The lower velocity of the lobe of Arenal flow is similar to that of lava front avalanches, that traveled about 750 m, observed in June 24, 1993 calculated at 40-50 km/h.

Volume

Taking into account the deposits and the crater topography previous and post event, we calculated a volume of $2.2 \pm 0.8 \times 10^6$ m³ for the pyroclastic avalanche. Since our calculations, *ca.* 75% of the total volume corresponds to juvenile material contained in the lava pool.

RECORDED SEISMOVOLCANIC ACTIVITY

The seismovolcanic activity is recorded in Fortuna station, located 3.5 km eastward from the active vent (Fig. 1). The activity was mainly characterized by explosion events, low frequency quakes and tremors. In Table 2 are summarized the total amount of recorded explosive and low frequency events per month, the monthly average per day and an

extrapolation of the amount of seisms assuming that all month was with the same pattern of seismicity. The amount of quakes during October and November confirms the less explosive behaviour of the volcano after August 28 eruption, going back to its behaviour in December.

TABLE 2: Recorded seismicity in Fortuna station, 3.5 km East of active vent.

MONTH	DR	NQR	DAQR	EXTRQ
January	24	796	33.2	1028
February	26	666	25.6	717
March	17	556	32.7	1014
April	26	802	30.9	925
May	NA	NA	NA	NA
June	NA	NA	NA	NA
July	NA	NA	NA	NA
August	NA	NA	NA	NA
September	NA	NA	NA	NA
October	29	377	13.0	403
November	30	230	7.7	230
December	28	813	29.0	900

DR: Days of recording. NQR: Number of quakes recorded.

DAQR: Daily average of quakes recorded.

EXTRS: Extrapolation of quakes with total month of records.

NA: Data not available.

A high-frequency earthquake (A-type) swarm was recorded in the seismic station Fortuna (FOR, 3.5 km east of the active vent) and in a portable seismographic station. At least 55 earthquakes (magnitude < 2) were recorded between May 11 and June 3, 1993 (Table 3). The nature of seismic signals was variable, suggesting a complex source. Unfortunately, no seismic locations were

possible, although the time delay between P and S waves (recorded times between 0.7 and 6.5 s) suggested a local source. Focal depths were calculated empirically between 20 km beneath the volcano edifice for the most first events and less than 1 km (accounted as originated near or into the volcano edifice) for the most latter ones (Table 3).

TABLE 3: A type quakes, Arenal Volcano, May - June 1993

PERIOD	DEPTH (km)	QUAKE AMOUNT
May 11 - May 16	Volcano edifice	1
	0-5	0
	5-10	6
	>10	13
May 17 - May 21	Volcano edifice	3
	0-5	3
	5-10	4
	>10	4
May 22 - June 3	Volcano edifice	9
	0-5	5
	5-10	6
	>10	1

The recorded seismic signals during the main events on August 28 are accounted in the chapter above. We must point out here that the seismic behaviour of the volcano changed

after the eruption, due to an open vent, which allowed to an almost continuing lava effusion, with few explosions, resulting in a period of mostly tremor recording, until December.

GROUND DEFORMATION

The western flank of Arenal has been deforming for several years, following a pattern of dountilting directed to the axis of the maximum overloading of lava flows. The most accurate ground deformation has been recorded in the station C, located 1.8 km westward from the active vent, which dountilted toward azimuth 78° almost constantly at a rate of 1.7-2.5 μ rad/month between 1986 and 1990 (Soto, 1991). A similar deformation pattern was observed until April 1992. Since then, a relatively anomalous

deformation was recorded, up to January 1993. Between January and July 1993, the volcano inflated, recorded in station C as 44 μ rad dountilt outward the edifice. Because the measurements are not continuous, but separated 184 days each other, we do not know when exactly occurred this inflation (anyway, it averages 7.2 μ rad/month). If we assume that the lava loading deformation is still operating as a background additional status, we obtain a total uptilt of 59 μ rad (or an average of 9.7 μ rad/month) during that period,

measured in point C (Table 4). Unfortunately, during the events of August 28, 1993, the station C was destroyed and we are lacking data after July 1993, to check a backward deflation or not of the volcano after the

eruption. Nevertheless, reports from OVSICORI-UNA (GVN Bulletin, 1993) account a post-eruptive deflation of 24 μ rad of the SW quadrant of the volcano.

TABLE 4: Ground deformation previous to Arenal's August 1993 eruption, as measured in station C, 1.8 km West of active vent.

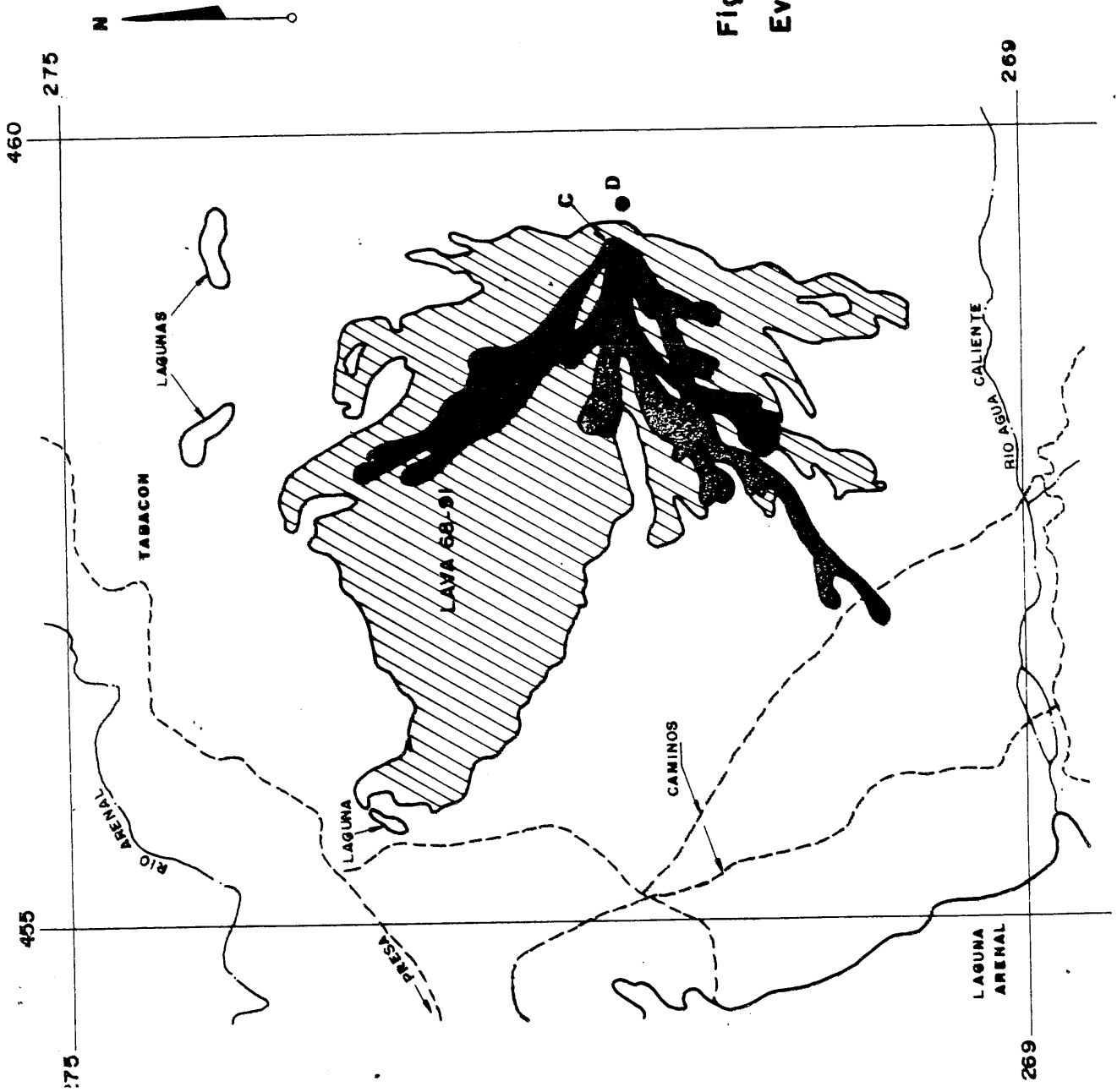
PERIOD	AZIMUTH	μ rad	TOTAL DAYS	μ rad/month
21Apr92-15Jul92	025°30'	34.75	85	12.3
15Jul92-04Nov92	153°21'	25.96	81	9.6
04Nov93-11Jan93	188°41'	6.89	68	3.0
11Jan93-14Jul93	252°47'	44.07	184	7.2

REFERENCIAS - REFERENCES

G.V.N. Bulletin, 1993: Arenal. Smithsonian Institution, Washington D.C., 18(12):3.

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

Soto, G.J., Arias, F. & Barquero, R., 1993: 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.



SIMBOLOGIA




-  LAVA 1993
-  LAVA 1992
-  LAVA 1968 - 91

Fig. 1 :
Evolución de las lavas del Arenal (1993).
Evolution of Arenal's lavas.



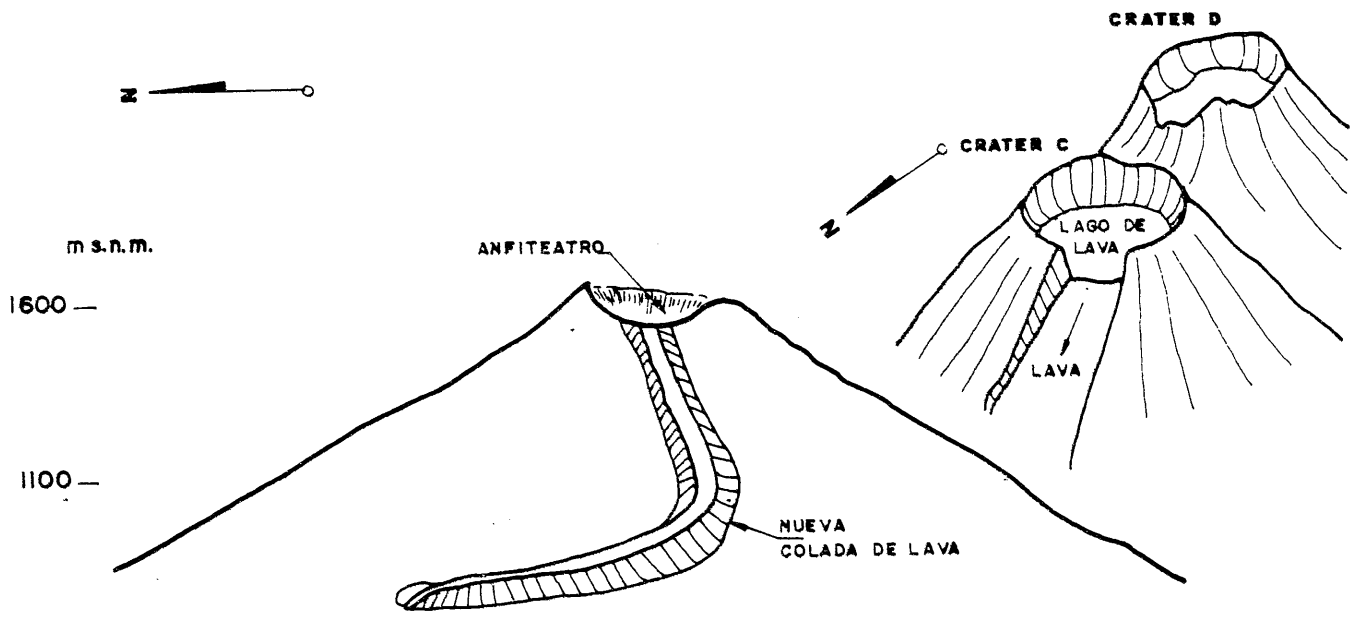


Fig. 2 : Vista del Arenal desde el Wen setiembre de 1993, que muestra el anfiteatro de avalancha del 28/8/93. A la derecha, una vista esquemática tridimensional.

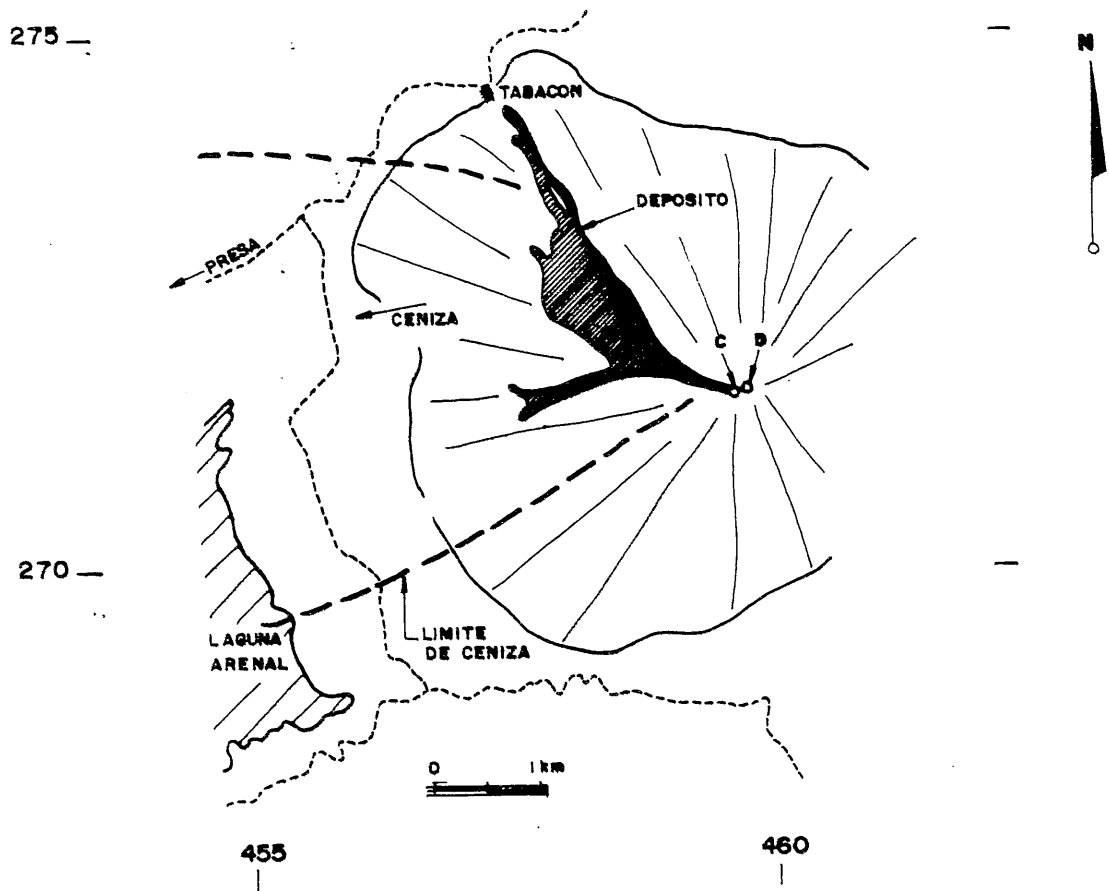
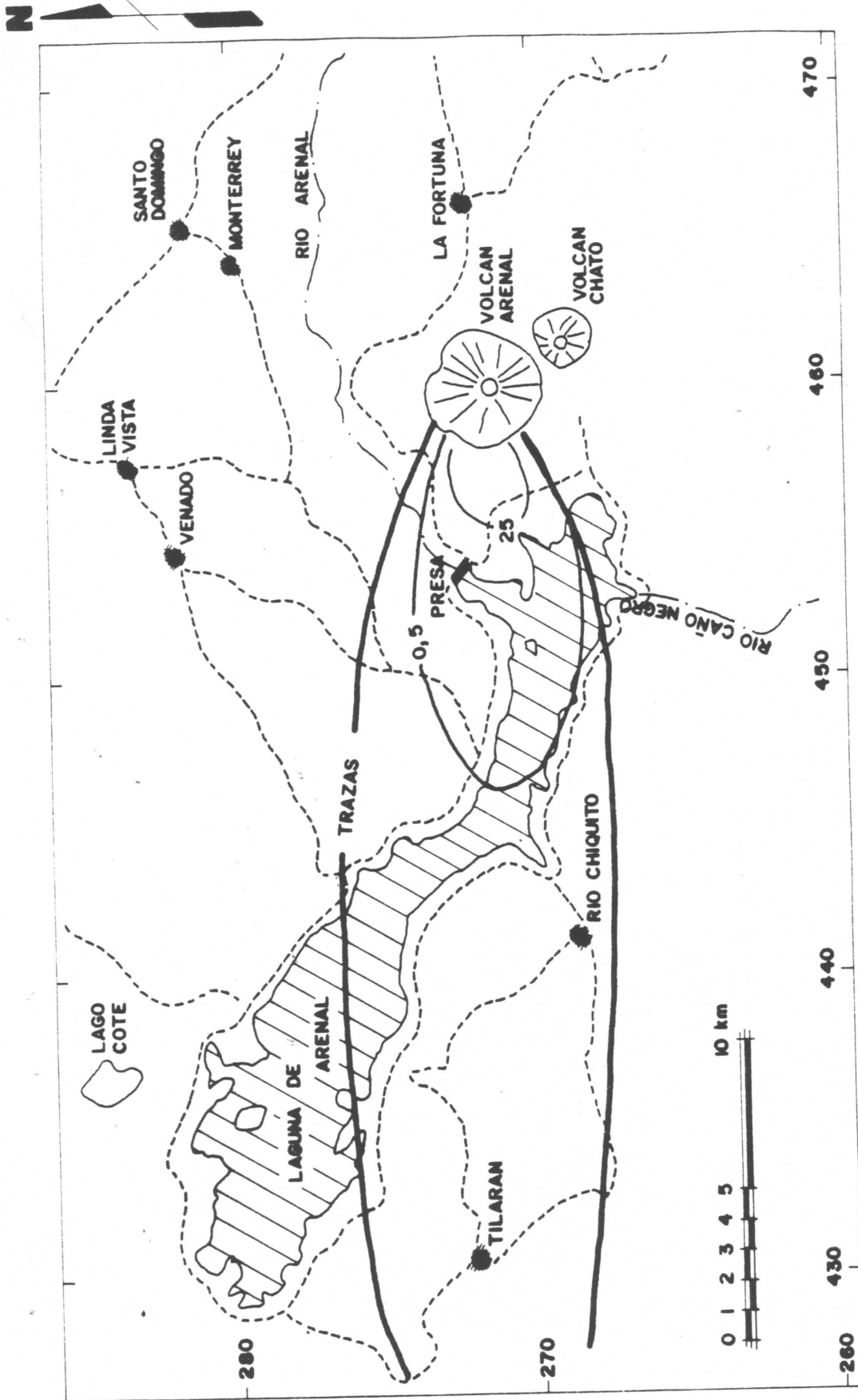


Fig. 3 : Depósito trilobado de la avalancha piroclástica del 28/8/93.



**Fig. 4 ESPESOR DE CENIZA Y LAPILLI ACRECIONAL,
28/8/93(en mm.)**

CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LAS SEÑALES SÍSMICAS Y ESTIMACIÓN DE V_p EN LA ESTRUCTURA SUPERFICIAL DEL VOLCÁN ARENAL

Jean-Philippe Métaxian¹, Philippe Lesage¹, Rafael Barquero² & Alain Creusot-Eon³

1: Laboratoire d'Instrumentation Géophysique, Université de Savoie, 73376 Le Bourget-du-Lac Cedex, Francia

2: Oficina de Sismología y Vulcanología, ICE, San José, Costa Rica.

3: Instituto Nicaragüense de Energía, Managua, Nicaragua.

Métaxian, J.-P., Lesage, P., Barquero, R. & Creusot-Eon, A., 1996: Características espectrales de las señales sísmicas y estimación de V_p en la estructura superficial del Volcán Arenal. Bol. Obs. Vulc. Arenal, 6(11-12):23-44, 1993, San José.

RESUMEN

Se analiza un conjunto de señales sísmicas registradas por tres estaciones digitales en el volcán Arenal. Estas señales provienen de tres tipos de eventos que son característicos de la actividad sísmica del Arenal: sismos volcánicos, explosiones y trémores. Usando un método de promediación de espectros, se identifica, entre los picos dominantes contenidos en los espectros, efectos de sitio y frecuencias características de las fuentes de los eventos.

Para los sismos volcánicos y las explosiones, las frecuencias dominantes de las fuentes son 0,65, 0,85 y 1,35 Hz. Los espectros de trémores incluyen un pico adicional asociado con la fuente de 1,20 Hz. La semejanza en los espectros y en la forma de los sismogramas de los temblores volcánicos y de las explosiones sugiere que estos dos tipos de evento tienen fuentes muy parecidas y cercanas. Se hace, por otra parte, una estimación de la velocidad de las ondas P en la parte superficial de la estructura del volcán. El cálculo, basado en las diferencias de tiempo de arribo de las ondas P y acústicas generadas por explosiones, da para V_p un valor mínimo de 1300 m s⁻¹.

ABSTRACT

We analyze a set of seismic signals recorded by three digital stations on Arenal volcano. Those signals are produced by the three types of events, which are typical of the Arenal seismic activity: volcanic earthquakes, explosions and tremors. By using a method of spectra averaging, we can identify, among the dominant peaks of spectra, both local structure effects and frequencies which are characteristics of the seismic sources.

For volcanic earthquakes and explosions, the dominant frequencies of sources are 0.65, 0.85 and 1.35 Hz. The tremor spectra include one more source peak at 1.20 Hz. The resemblance of spectra and waveforms of volcanic earthquakes and explosions suggests that both types of events have very similar and close sources. Furthermore, we estimate the P-waves velocity in the shallow part of the volcanic structure, by using delays between arrival of P-waves and acoustic waves produced by explosions; our calculation gives for V_p a minimal value of 1300 m s⁻¹.

INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica del volcán Arenal se compone principalmente de sismos volcánicos, de explosiones y de trémores. Hasta la fecha, pocos estudios detallados se han llevado a cabo sobre estos eventos

sísmicos. Minakami *et al.* (1969), Alvarado & Barquero (1987) y Barquero *et al.* (1992) estudiaron las señales sísmicas obtenidas entre 1968 y 1986. Ellos establecieron una clasificación de las señales usando los criterios

de forma de ondas y su relación con las fases de actividad. Morales *et al.* (1988) hicieron un análisis espectral de señales registradas entre 1984 y 1988. Encontraron que el contenido espectral de los sismos asociados con actividad explosiva o efusiva está en el rango de 1 a 4 Hz, con frecuencias dominantes alrededor de 2 Hz.

En 1990, registramos la actividad del Arenal durante un mes, usando una red de cuatro estaciones sísmicas digitales. Durante el período de registro, la actividad del volcán fue intensa, con numerosas explosiones estrombolianas y fuertes emisiones de gas,

bloques incandescentes y bombas (GVN, 1990; Barquero & Soto, 1990). Usando los registros digitales, estudiamos algunas características de la estructura y de las señales sísmicas de este volcán. En este trabajo, analizamos por una parte, el contenido espectral de las señales sísmicas, intentando identificar los efectos de la fuente y los de propagación o de sitio y comparando así las propiedades de las fuentes de los distintos tipos de evento. Por otra parte, hacemos una estimación de la velocidad de las ondas P en las capas superficiales del volcán usando las diferencias de tiempo de arribo de las ondas P y de las ondas acústicas generadas por explosiones.

DATOS

Una red de cuatro estaciones sísmicas con almacenamiento digital funcionó en el Arenal del 15 de marzo al 15 de abril de 1990. Se usaron estaciones de tipo CEIS-Espace Hades-110, equipadas con sismómetros Mark Products L4-C (1 Hz). Estas estaciones detectan los eventos usando un algoritmo de tipo STALTA y digitalizan la señal con una

frecuencia de muestreo de 100 Hz. Almacenan los 4 u 8 eventos más importantes de cada período de 24 horas, hasta su transferencia a una microcomputadora. Las estaciones fueron colocadas alrededor del centro activo (Figura 1). La tabla 1 da las distancias oblicuas y horizontales entre el cráter y las estaciones.

TABLA 1 : Altura de las estaciones y distancias entre ellas y el cráter activo.

Estación	Altura (m s.n.m.)	Dist. oblicua (m)	Dist. hor. (m)
ARSU	750	3600	3540
ARNO	720	1930	1800
AROE	620	3830	3740
ARE	550	2440	2280

Por problemas técnicos, ninguna estación se mantuvo funcionando continuamente durante todo el período de estudio. En particular, la estación ARNO

funcionó sólo del 22 al 25 de marzo y la mayoría de sus registros están saturados a causa de su cercanía al cráter. No fue posible utilizar los datos de esta estación. Las otras

tres estaciones funcionaron simultáneamente sólo durante el período del 4 al 8 de abril. La mayoría de los eventos estudiados en el presente trabajo se produjeron durante este período. De los 15 a 20 temblores detectados diariamente por estas estaciones, pocos registros están saturados.

Se clasifican los eventos en tres tipos: temblores de tipo volcánico (tipo B en la clasificación de Minakami, 1969), explosiones volcánicas y trémores. Durante los primeros días del mes de abril, aproximadamente 50% de los eventos registrados fueron explosiones volcánicas. La figura 2 muestra unos ejemplos de explosiones volcánicas registradas por las estaciones ARSU, AROE y ARE. El primer arribo de las ondas sísmicas es emergente y poco visible para las estaciones más lejanas (ARSU y AROE), seguido luego un tren de ondas de mayor amplitud que son probablemente ondas superficiales. Las ondas acústicas son impulsivas y de alta frecuencia. Su amplitud es menor en los registros de ARE, lo que se puede explicar por el hecho de que esta estación se encuentra en la falda este del

volcán y atrás de la cima del edificio con respecto al cráter.

Los temblores de tipo volcánico tienen primeros arribos emergentes y una duración de 20 a 40 segundos. La figura 3 muestra sismogramas obtenidos en las estaciones más lejana (AROE) y más cercana (ARE) al cráter. Se nota que los registros obtenidos en la estación más cercana tienen una frecuencia más alta. Las formas de onda de los sismos volcánicos y de las explosiones son muy parecidas; la principal diferencia es la llegada de ondas acústicas de alta frecuencia para las explosiones. La figura 4 muestra que se pasa sin discontinuidad de las explosiones a los temblores volcánicos disminuyendo la amplitud de las ondas acústicas. Esta observación sugiere que no existen diferencias fundamentales entre estos dos tipos de eventos; el análisis espectral descrito más adelante lo corrobora. Los trémores volcánicos tienen una duración superior a la duración de registro de las estaciones (40 segundos; Fig. 5); su amplitud es inferior a la de los sismos volcánicos (tabla 2).

TABLA 2 : Valores medios de las amplitudes máximas de cada señal por estación (en μms^{-1}).

Señales	AROE	ARSU	ARE
Temblores volcánicos	2,8	1,2	2,9
Explosiones	2,4	0,9	1,8
Trémores volcánicos	1,2	0,5	2,0

Las amplitudes de los sismogramas de AROE y de ARE son parecidas para los tres tipos de evento, mientras que las señales observadas en ARSU tienen una amplitud menor; esto puede indicar un efecto de sitio o

una mayor atenuación de las ondas sísmicas en la parte sur del volcán. Se observa también que la amplitud máxima de los temblores volcánicos es superior a la de las explosiones.

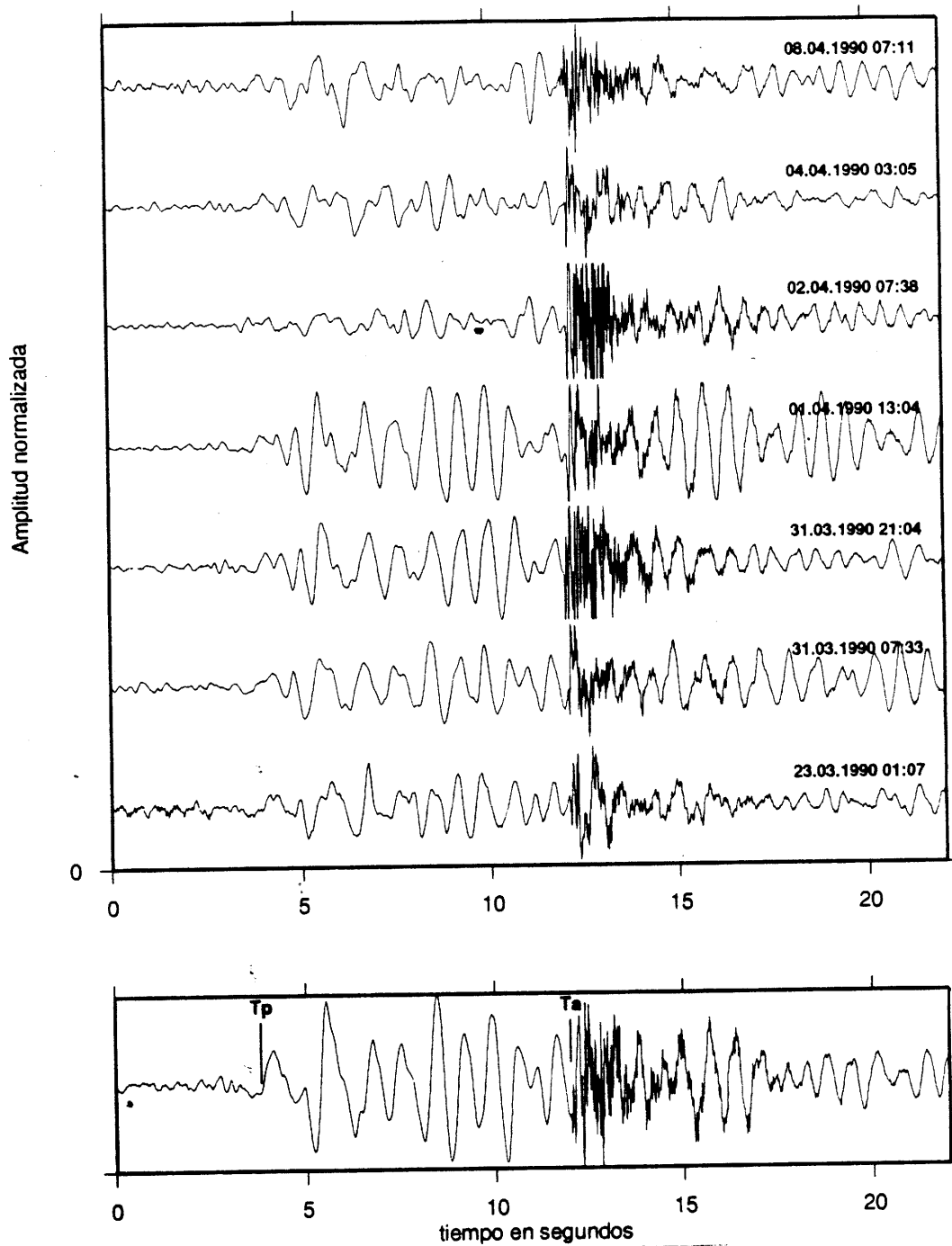


Figura 2a: Estación ARSU. Arriba: registros de explosiones volcánicas.
Abajo: apilamiento de los registros.

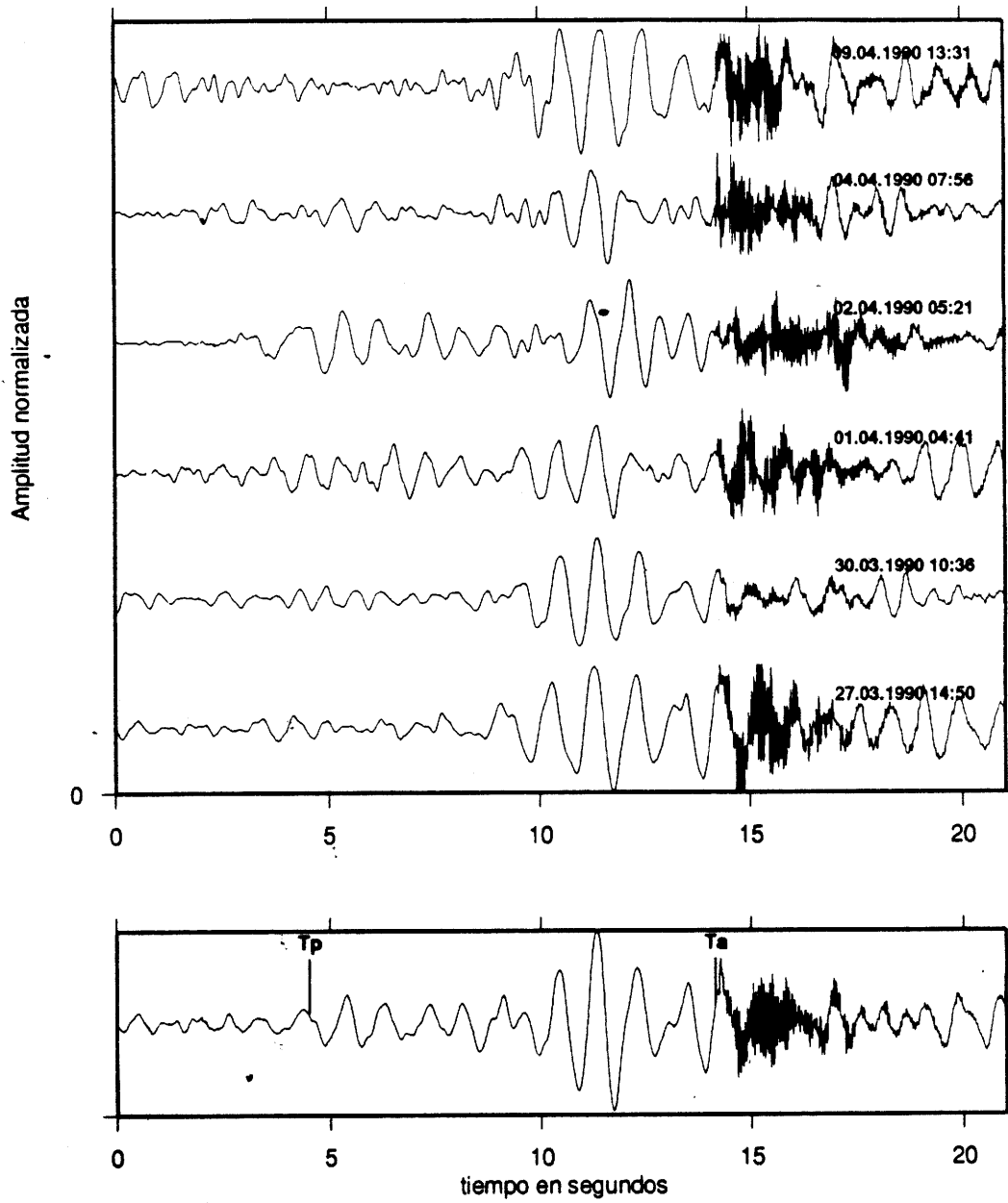


Figura 2b: Estación AROE. Arriba: registros de explosiones volcánicas.
Abajo: apilamiento de los registros.

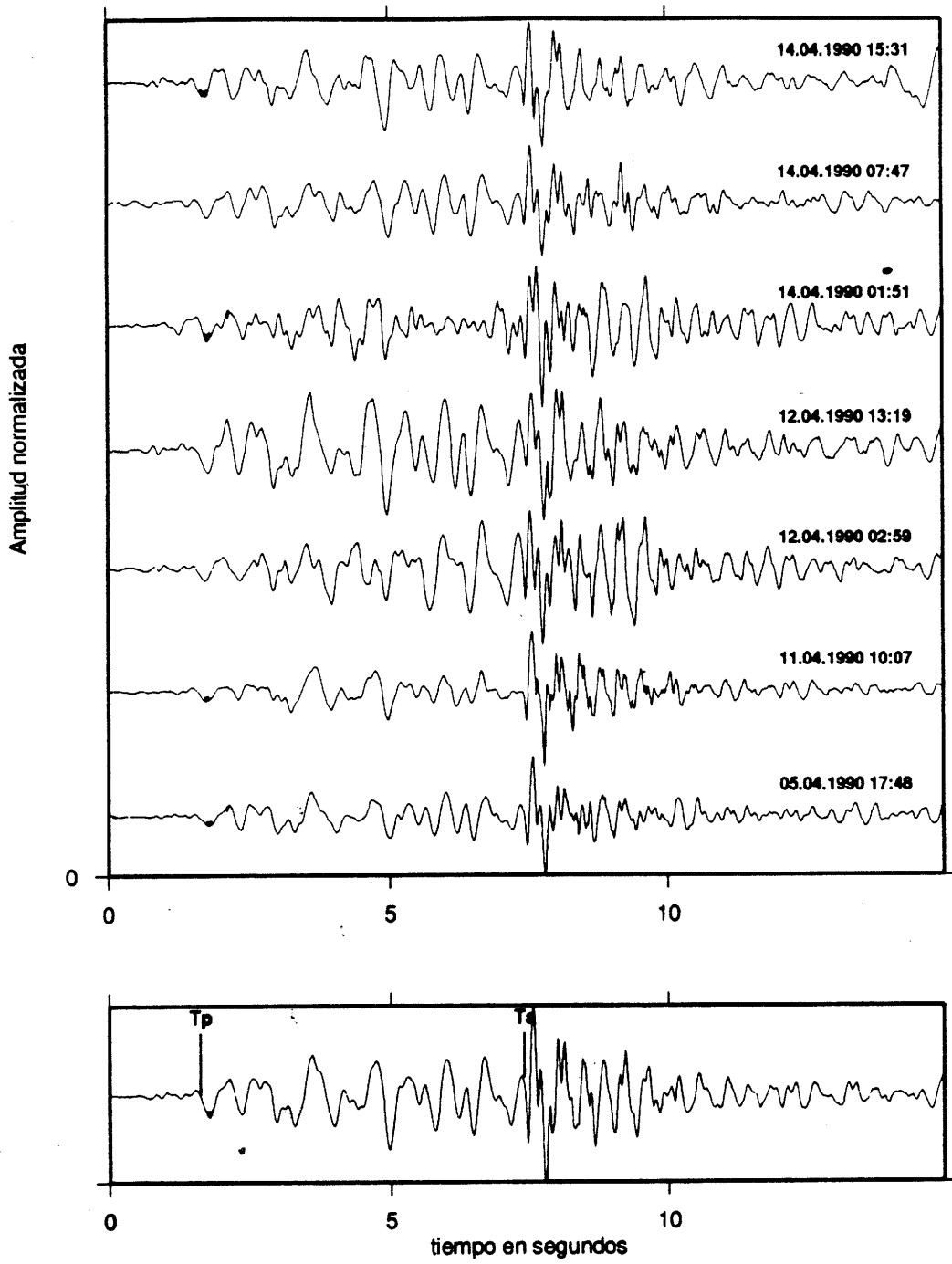


Figura 2c: Estación ARE. Arriba: registros de explosiones volcánicas. Abajo: apilamiento de los registros.

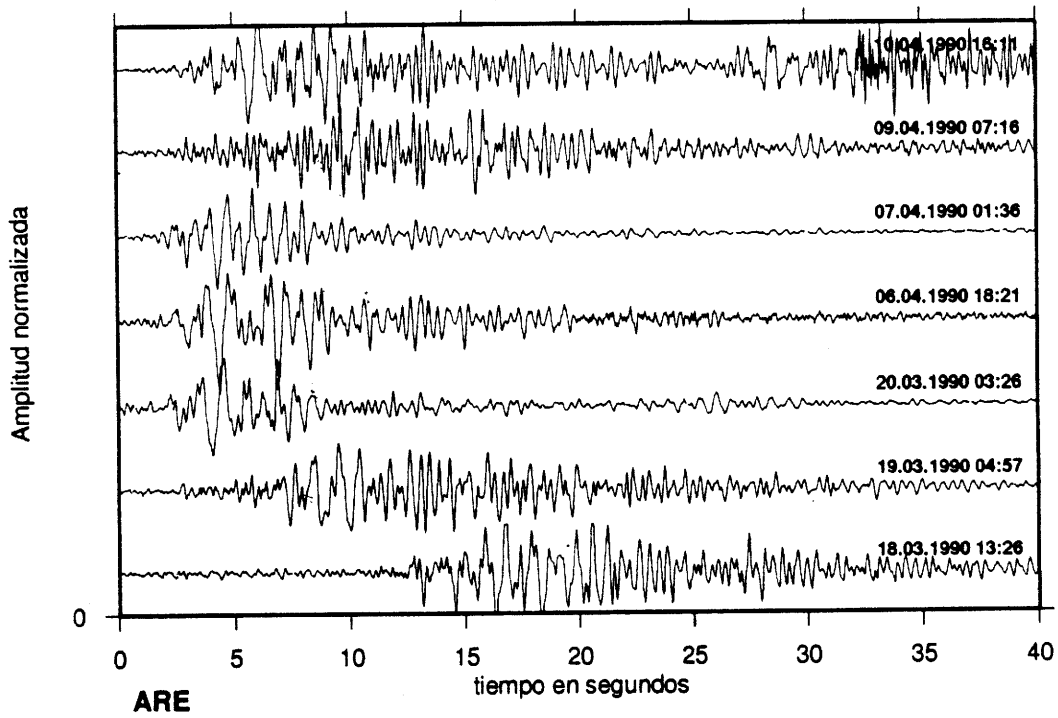
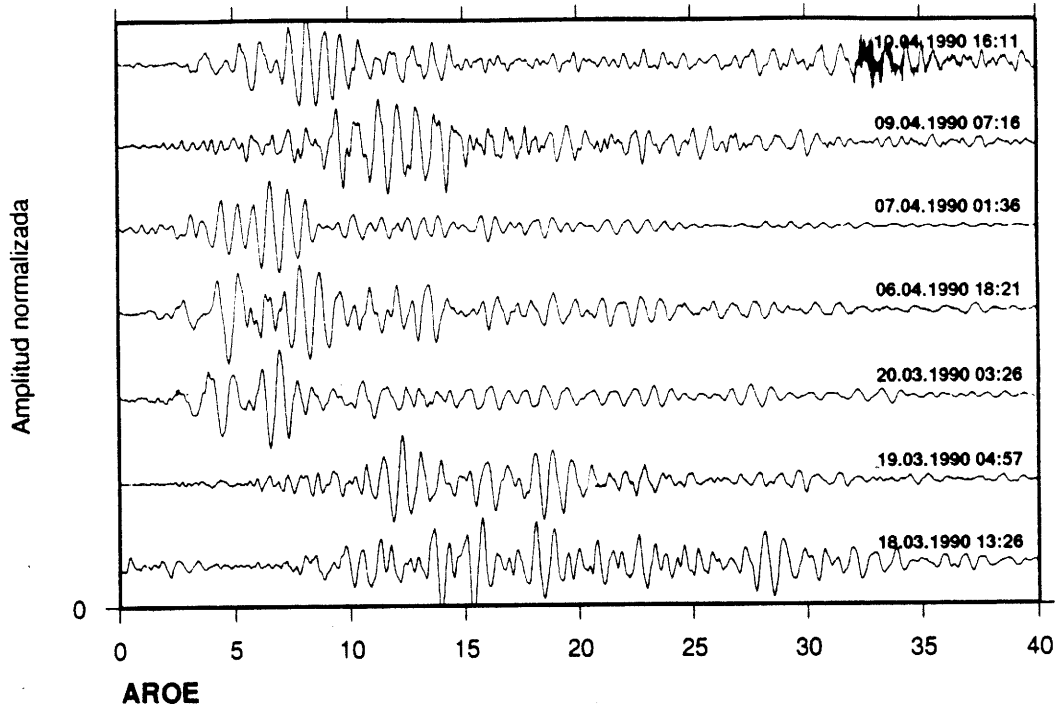


Figura 3: Ejemplos de temblores de tipo volcánico.

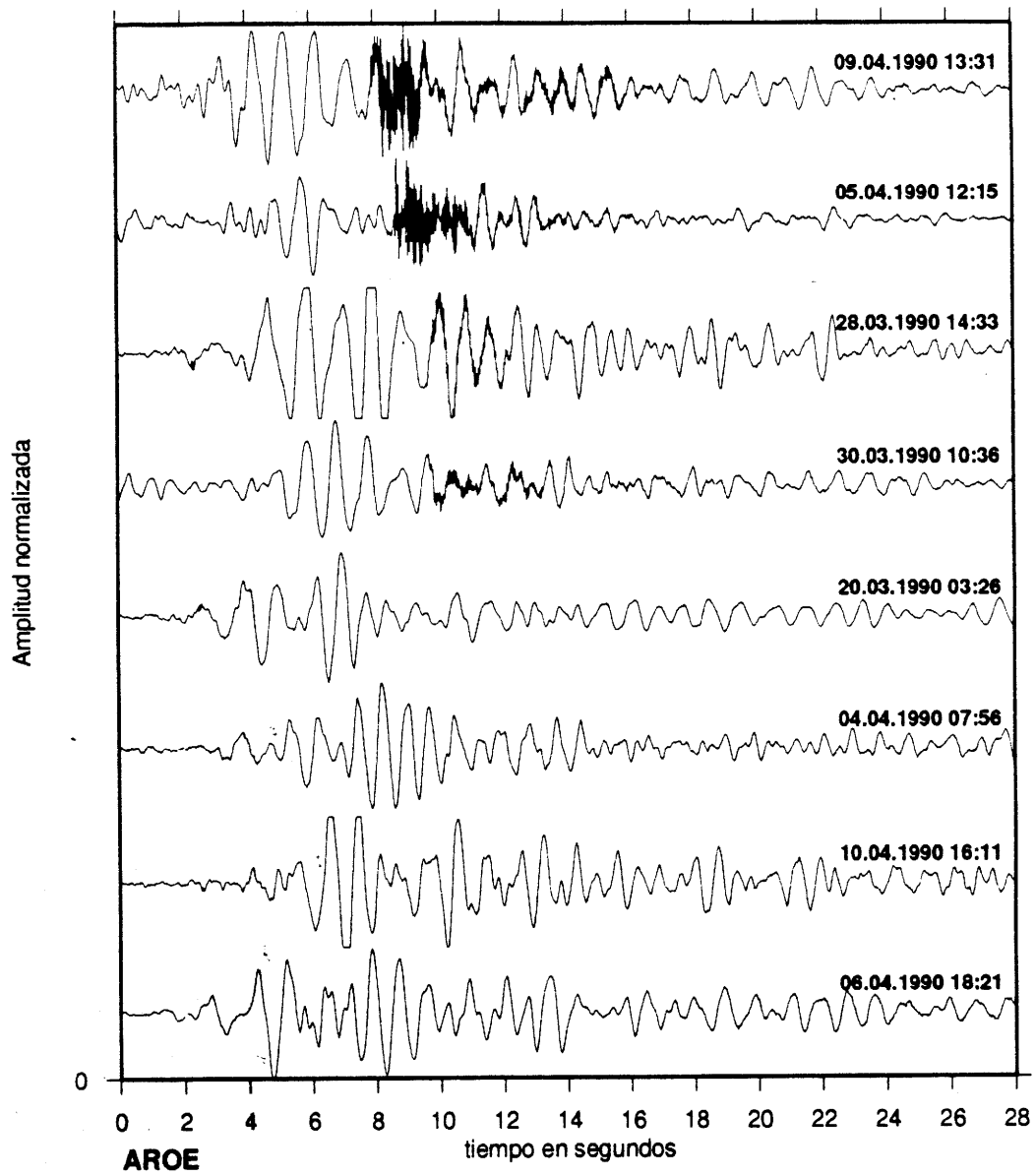


Figura 4: Registros de temblores volcánicos y de explosiones. Se nota la semejanza entre los dos tipos de señales.

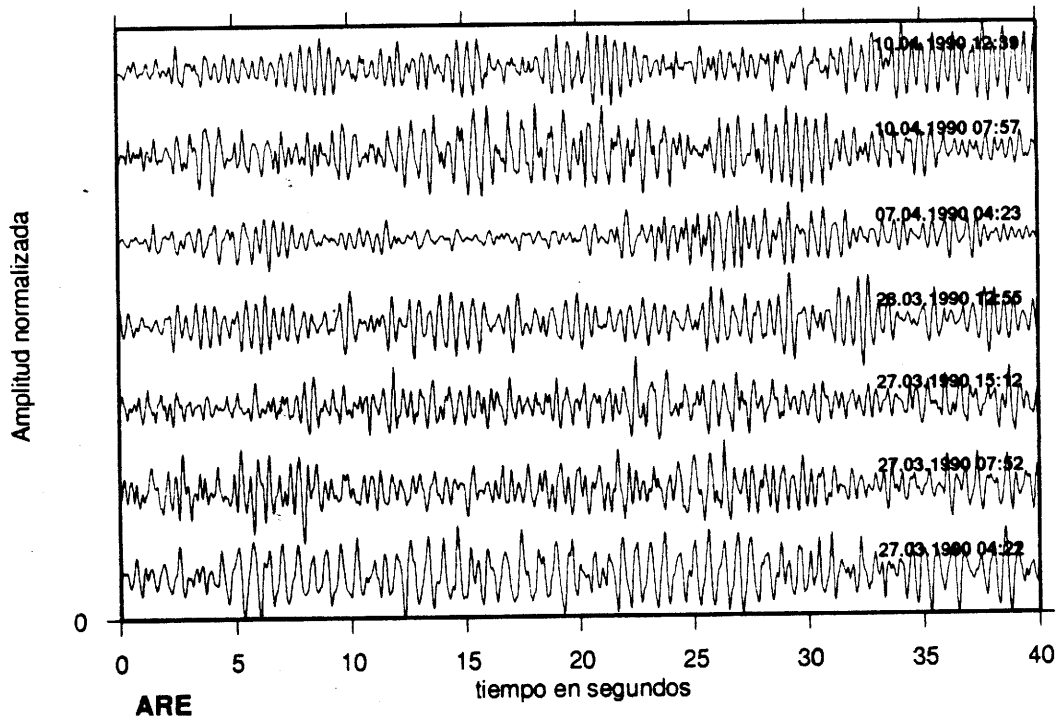
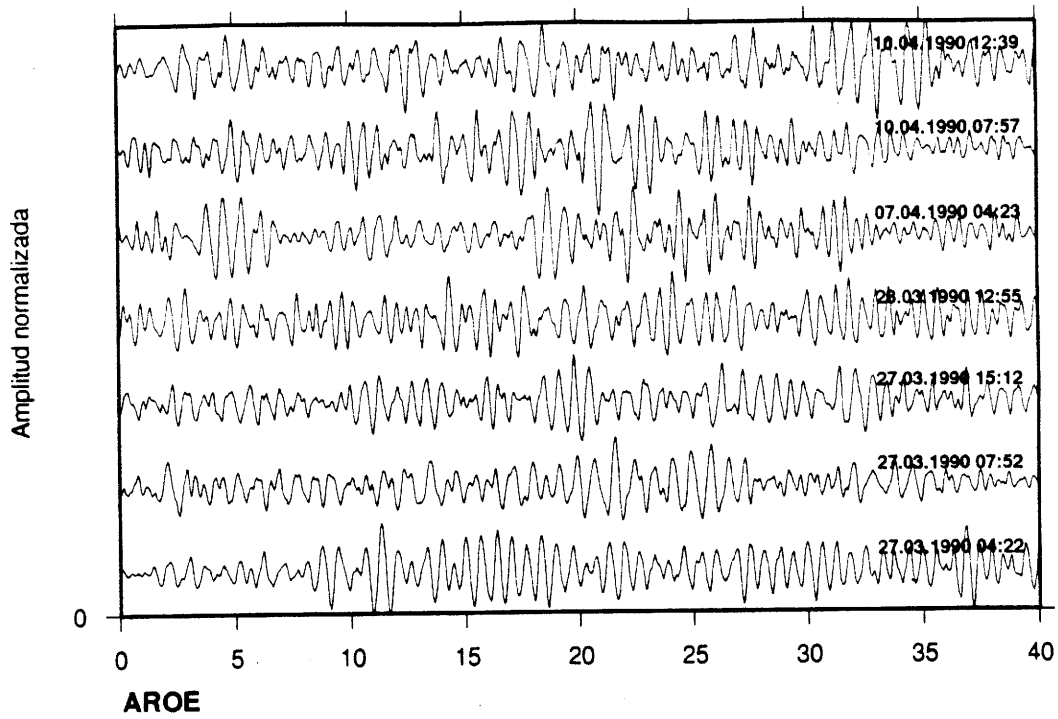


Figura 5: Registros de trémores volcánicos.

ANÁLISIS ESPECTRAL

Todos los espectros aquí presentados son espectros de desplazamiento con corrección de la respuesta instrumental. Para los sismos volcánicos y las explosiones, se calculó la transformada de Fourier de los 10,24 primeros segundos de señal. Para los trémores se tomó 20,48 segundos, lo que da mejor definición espectral. Todos los espectros obtenidos para los tres tipos de evento contienen varios picos en el rango de frecuencias entre 0,6 y 4 Hz; casi no hay energía en las señales para frecuencias mayores que 4 Hz.

Se puede observar que algunos picos están presentes en los espectros de todos los eventos del mismo tipo y en todas las estaciones, que otros picos existen para varios tipos de señal y que ciertos picos se encuentran sólo en los espectros de una sola estación. La figura 6 muestra unos ejemplos de espectros de señales obtenidas en dos estaciones; se notan picos comunes ya sea a ambas estaciones o a varios tipos de evento. Es probable que un pico observado en una sola estación sea un efecto de estructura local cerca de la estación y que un pico observado en todas las estaciones sea característico de la fuente sísmica. Es importante pues, identificar estos dos tipos de pico.

Para facilitar dicha identificación, utilizamos un método de promediación de espectros. Se puede expresar una señal sísmica como:

$$s(t) = f(t) * p(t) + r(t)$$

donde $f(t)$ es la función temporal de fuente, $p(t)$ representa la función de propagación de las ondas sísmicas y $r(t)$ es ruido aleatorio; el símbolo $*$ representa la convolución de dos funciones. En el dominio frecuencial, la

relación correspondiente es:

$$S(f) = F(f) \cdot P(f) + R(f)$$

donde $S(f)$, $F(f)$, $P(f)$ y $R(f)$ son las transformadas de Fourier de $s(t)$, $f(t)$, $p(t)$ y $r(t)$, respectivamente. Sumando los espectros de un evento registrado en varias estaciones, se obtiene:

$$\sum_{i=1}^n S_i(f) = F(f) \cdot \sum_{i=1}^n P_i(f) + \sum_{i=1}^n R_i(f) \quad (1)$$

puesto que la función temporal de fuente es la misma para todos los espectros. Asimismo, sumando los espectros de varios eventos registrados en una estación, se obtiene:

$$\sum_{i=1}^n S_i(f) = \sum_{i=1}^n [F_i(f)] \cdot P(f) + \sum_{i=1}^n R_i(f) \quad (2)$$

puesto que las funciones de propagación son las mismas si las fuentes están cercanas las unas de las otras.

En los dos tipos de suma, la contribución del ruido aleatorio disminuye, mientras que los términos comunes, $F(f)$ en el primer caso o $P(f)$ en el segundo, son amplificadas. Usando este método, no se puede separar completamente los efectos de la fuente y los de propagación y de sitio, sino amplificar la amplitud relativa de los picos correspondientes en los espectros promediados. Usamos el primer tipo de promediación para cada tipo de señal, salvo para los trémores que no se detectaron en más de dos estaciones simultáneamente. La figura 7 representa los espectros promediados para sismos volcánicos y explosiones. En cuanto a los trémores, comparamos solamente los espectros de varios eventos registrados ya sea por las estaciones AROE y ARSU, o por AROE y ARE. Hicimos luego el segundo tipo de promedio para los mismos eventos. La

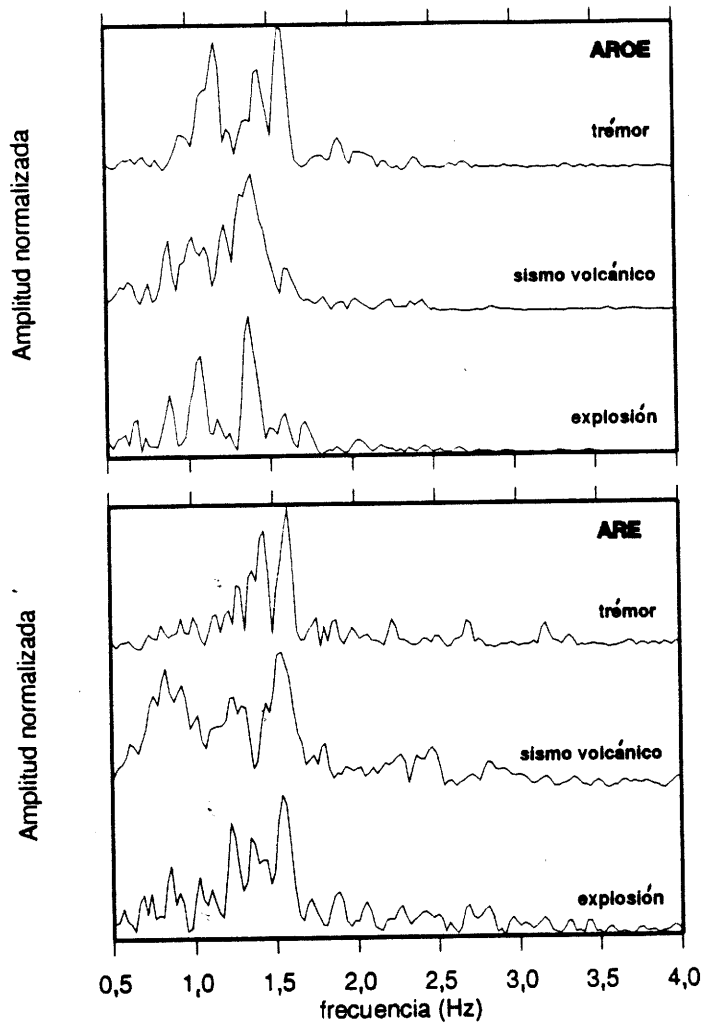


Figura 6: Ejemplos de espectros de distintos tipos de señales volcánicas.

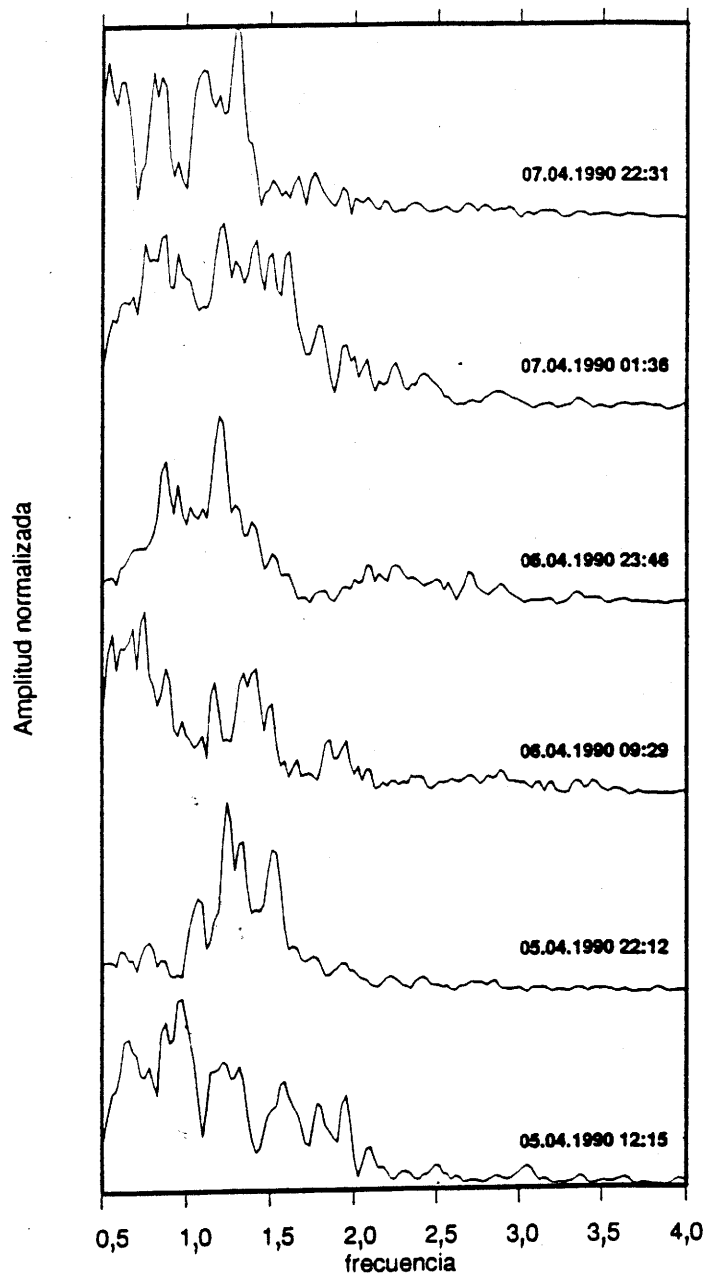


Figura 7a: Espectros promediados de temblores volcánicos registrados por tres estaciones.

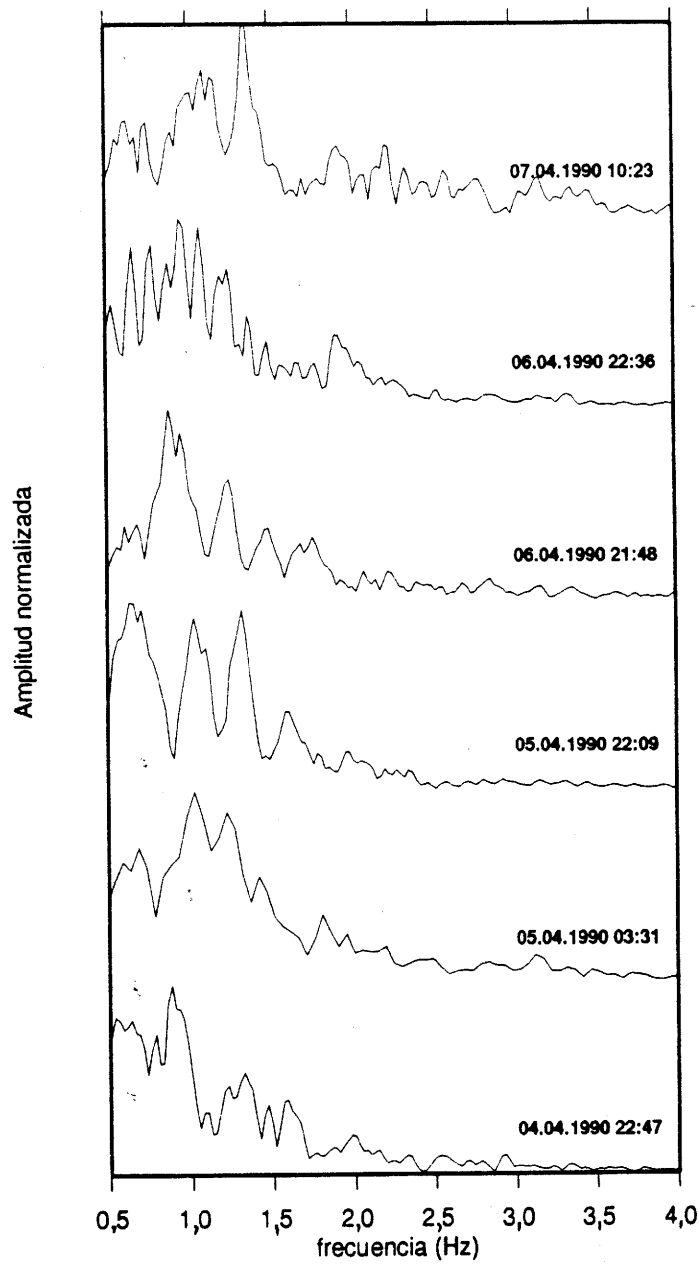


Figura 7b: Espectros promediados de explosiones registradas por tres estaciones.

figura 8 muestra los espectros promediados por estación, para cada tipo de evento. De este conjunto de espectros promediados, sacamos los picos de mayor amplitud e identificamos los

que existen en las tres estaciones y los que aparecen sólo en una estación para varios tipos de evento. Se presenta el resultado de este análisis en la tabla 3.

TABLA 3: Resultado del análisis espectral de las señales sísmicas. Para cada frecuencia, el símbolo en una casilla indica la presencia de un pico en los espectros, para el tipo de evento y la estación correspondientes. El tipo de símbolo indica la interpretación del origen del pico: X es efecto de la fuente sísmica; O es efecto de sitio; \oplus es origen no determinado. VOL es sismo volcánico, EXP es explosión, TRE es trémor.

	f=0,65 Hz	f=0,75 Hz	f=0,85 Hz	f=0,95 Hz
	VOL EXP TRE	VOL EXP TRE	VOL EXP TRE	VOL EXP TRE
ARSU	X X X	O O O	X X X	O O O
AROE	X X X		X X X	
ARE	X X X	\oplus \oplus	X X X	\oplus \oplus
	f=1,10 Hz	f=1,20 Hz	f=1,35 Hz	f=1,40 Hz
ARSU		\oplus \oplus X	X X X	\oplus \oplus
AROE	O O O	\oplus \oplus X	X X X	\oplus \oplus
ARE			X X X	
	f=1,55 Hz	f=1,70 Hz	f=1,80 Hz	f=1,95 Hz
ARSU		O O O	O O O	O O O
AROE				
ARE	O O \oplus			

Varios picos en los espectros provienen de efectos de sitio o de propagación local. Para la estación ARSU, se notan picos de este tipo a frecuencias de 0,75, 0,95, 1,70, 1,80 y

1,95 Hz; para las estaciones AROE y ARE, a frecuencias de 1,1 y 1,55 Hz respectivamente. La tabla 4 resume las propiedades espectrales de las fuentes de los diferentes tipos de evento.

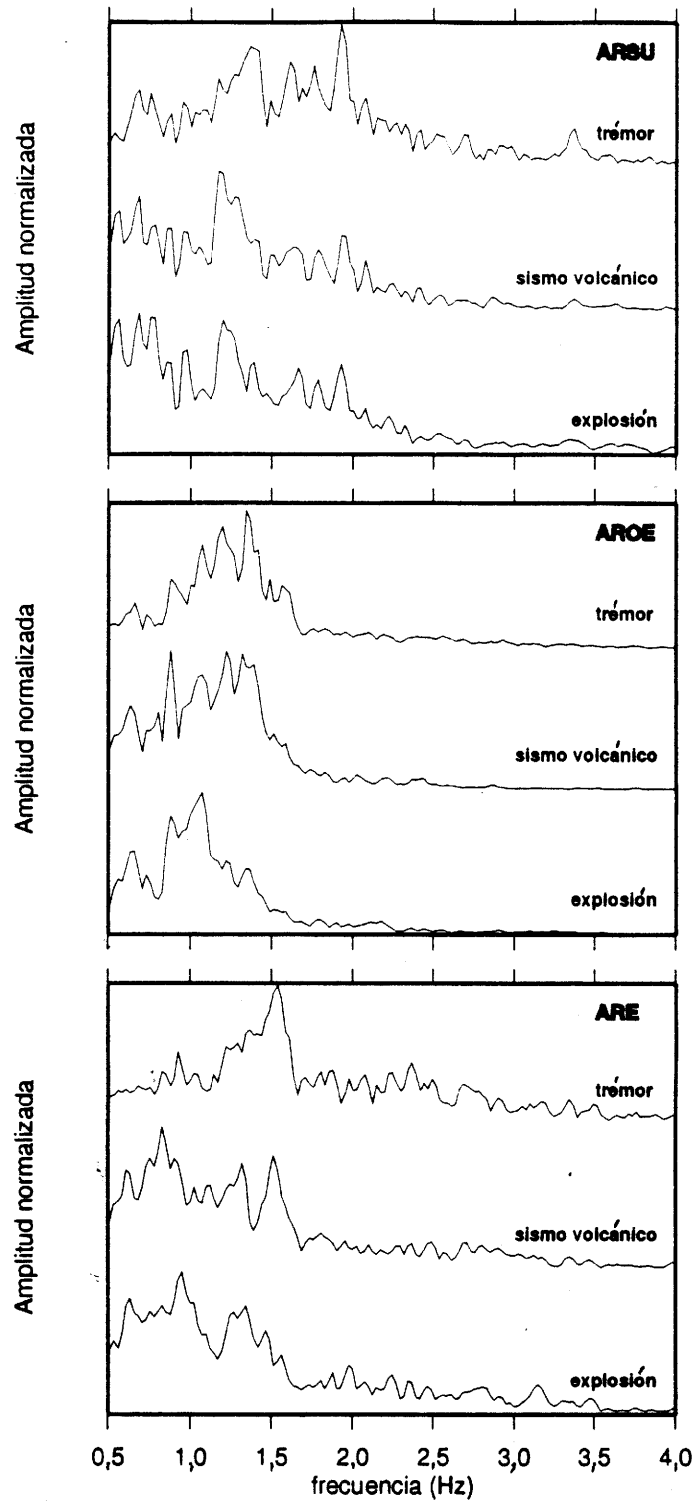


Figura 8: Espectros promediados por estación.

TABLA 4: Frecuencias de los picos que provienen de efectos de fuente.

Tipo de evento	Frecuencia de los picos (Hz)
Sismos volcánicos	0,65 ; 0,85 ; 1,35
Explosiones	0,65 ; 0,85 ; 1,35
Trémores	0,65 ; 0,85 ; 1,20 ; 1,35

Se observa que los sismos volcánicos y las explosiones producen picos a las mismas frecuencias. Además, los trémores tienen tres picos comunes con ellos. Este resultado sugiere que las fuentes de los tres tipos de

evento, y particularmente de los temblores volcánicos y explosiones, tienen propiedades físicas parecidas. Esto concuerda con la semejanza de la forma de los sismogramas entre sismos volcánicos y trémores.

ESTIMACIÓN DE V_p USANDO REGISTROS DE EXPLOSIONES

Estimamos la velocidad de propagación de las ondas P en la estructura superficial del volcán, usando los tiempos de arribo de las ondas P y de las ondas acústicas generadas por varias explosiones y registradas por las tres estaciones. Para llevar a cabo dicha estimación, hicimos las hipótesis siguientes:

- a) Las ondas sísmicas y acústicas tienen fuentes comunes o al menos localizadas en la misma vertical; estas fuentes son poco profundas, fijas y se encuentran en el cráter activo.
- b) La velocidad de las ondas acústicas es $V_a=330 \text{ m s}^{-1}$, valor apropiado para una altura media de 1000 m (Gordeev, 1992).
- c) Las trayectorias recorridas por las ondas sísmicas y acústicas tienen una longitud aproximadamente igual a la distancia oblicua entre el cráter y las estaciones.

La última hipótesis lleva a suponer que el primer arribo es el de la onda P directa, y que ella se propaga en un medio homogéneo.

Veremos más adelante que esta suposición conduce a una subestimación de V_p . Se tiene que suponer también que las ondas acústicas se propagan en línea recta, lo que requiere línea de vista entre el cráter y la estación. Sólo la estación AROE tiene vista directa al cráter; sin embargo, es posible calcular y aplicar correcciones a los tiempos de arribo para las otras estaciones.

Es difícil medir el tiempo de arribo de las ondas P generadas por las explosiones debido a su carácter emergente. Para mejorar la precisión de esta medición, seleccionamos los registros con menos ruido y en los que la llegada de ondas acústicas es suficientemente clara. Sumamos luego los registros de cada estación después de hacer coincidir los tiempos de arribo de la fase sonora. Los resultados de este empilamiento de sismogramas (figura 2) muestran un mejoramiento de la razón señal/ruido para las ondas P, y es más fácil así determinar su tiempo de arribo. Esto confirma también que la posición de las fuentes de las explosiones es aproximadamente fija.

La comparación de los tiempos de arribo de las ondas acústicas en las diferentes estaciones señala importantes anomalías de los tiempos de recorrido. Por ejemplo, la fase sonora llega a la estación AROE a un

promedio de 0,88 segundos antes de ARSU, cuando debería llegar 0,70 segundos después debido a la diferencia de distancias entre el cráter y las dos estaciones. La tabla 5 da los valores de estas anomalías.

TABLA 5: Anomalías del tiempo de recorrido de las ondas acústicas. Para cada par de estaciones, se da la diferencia de los tiempos de arribo δT_a observada (promedio de varios eventos) y la diferencia δT_a calculada a partir de las distancias cráter-estación, así como el retardo $R = \delta T_a \text{ obs.} - \delta T_a \text{ cal.}$ y la distancia acústica equivalente $D = R V_a$.

Par de estaciones	AROE-ARSU	AROE-ARE	ARSU-ARE
Diferencia de distancia (m)	2300	1390	1160
δT_a observada (s)	-0,88	2,53	3,42
δT_a calculada (s)	0,70	4,21	3,51
$R = \delta T_a \text{ obs.} - \delta T_a \text{ cal.}$	-1,58	-1,68	-0,09
Distancia equivalente (m)	520	550	30

Estas anomalías del tiempo de recorrido se deben probablemente a efectos de la topografía del volcán y a la influencia del viento. La estación AROE se encuentra en la falda oeste y tiene vista directa al cráter. En este caso, se puede suponer que las ondas sonoras se propagan en línea recta del cráter a AROE. En cambio, para las estaciones ARE y ARSU, el cráter es ocultado por la cima o las laderas del volcán (figura 9). La trayectoria de las ondas acústicas no es directa, lo que produce una parte de las anomalías observadas. Para llegar hasta ARE, por ejemplo, el sonido debe ya sea pasar por encima del edificio o darle la vuelta; se calcula que debe recorrer una distancia adicional de 150 a 250 metros por lo menos. Además, la propagación de las ondas acústicas puede ser afectada por el viento que sopla usualmente de este a oeste en esta región.

Para tomar en cuenta estas anomalías, usamos la estación AROE como referencia y corregimos los tiempos de arribo de las ondas acústicas en las otras estaciones por el retardo R dado en la tabla 5. Esto lleva, como primera aproximación, a estimar el tiempo de recorrido de ondas acústicas que se propagarían en línea recta entre el cráter y las estaciones. En este caso, y tomando en cuenta las hipótesis enunciadas más arriba, se puede escribir:

$$D = V_a T_a = V_p T_p$$

donde D es la distancia entre la fuente y una estación y V_a , V_p , T_a , T_p son las velocidades y los tiempos de recorrido respectivos para ondas acústicas y ondas P. Se obtiene fácilmente:

$$T_a - T_p = (V_p/V_a - 1) T_p = (V_p/V_a - 1) (H_p - H_0),$$

donde H_p y H_0 son respectivamente la hora de arribo de las ondas P y la hora origen de la explosión. Se obtiene así una relación lineal entre $(T_a - T_p)$ y H_p cuya pendiente $(V_p/V_a - 1)$ da la velocidad V_p . La tabla 6 indica los valores utilizados para los cálculos y la figura

10 muestra la relación entre $(T_a - T_p)$ y H_p , usando $H_0=0$ para ARE como origen de tiempo. Usando una regresión lineal, se obtiene una pendiente de 2,95, lo que corresponde a $V_p=1300 \text{ m s}^{-1}$.

TABLA 6: Valores utilizados para la estimación de V_p .

Estación	ARE	ARSU	AROE
Distancia al cráter (m)	2240	3600	3830
Retardo acústico (s)	-1,68	-1,58	0
$(T_a - T_p)$ observado (s)	5,85	8,18	7,65
$(T_a - T_p)$ corregido (s)	4,17	6,60	7,65
$(H_p - H_0)$ (s)	0	0,95	1,10

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Este trabajo, basado en el análisis de un pequeño número de señales sísmicas registradas en sólo tres estaciones, proporciona cierta información sobre las características de la actividad sísmica y la estructura del Arenal.

La estimación de la velocidad de las ondas P, usando registros de explosiones volcánicas, se hace con un método muy simple. La precisión del resultado depende de la validez de las hipótesis y de las aproximaciones que hicimos. Alvarado & Barquero (1987) mostraron que la fuente de las explosiones se encuentra a menos de 100 metros de profundidad bajo el cráter. Variaciones de esta profundidad afectan la estimación de la hora origen de las explosiones, pero no modifican notablemente el valor obtenido para la velocidad. La principal aproximación en este cálculo es el suponer que las ondas P y acústicas recorren una trayectoria de longitud

igual a la distancia oblicua entre el cráter y la estación. Para las ondas acústicas, hicimos correcciones a los tiempos de recorrido para tomar en cuenta la distancia realmente recorrida por el sonido. Es probable también que las ondas sísmicas recorran una distancia superior a la distancia oblicua. En consecuencia la estimación obtenida para V_p es probablemente por debajo del valor real. Por otra parte, el resultado está poco constreñido dado el pequeño número de estaciones utilizadas. Sin embargo, nuestra estimación de V_p para el Arenal tiene el mismo valor ($V_p=1300 \text{ m s}^{-1}$) que obtuvo Gordeev (1992), usando un método parecido en el volcán Tolbachik, Kamchatka.

Varios autores observaron que los sismogramas y los espectros de sismos volcánicos y trémores son muy semejantes; concluyen que los trémores se componen de

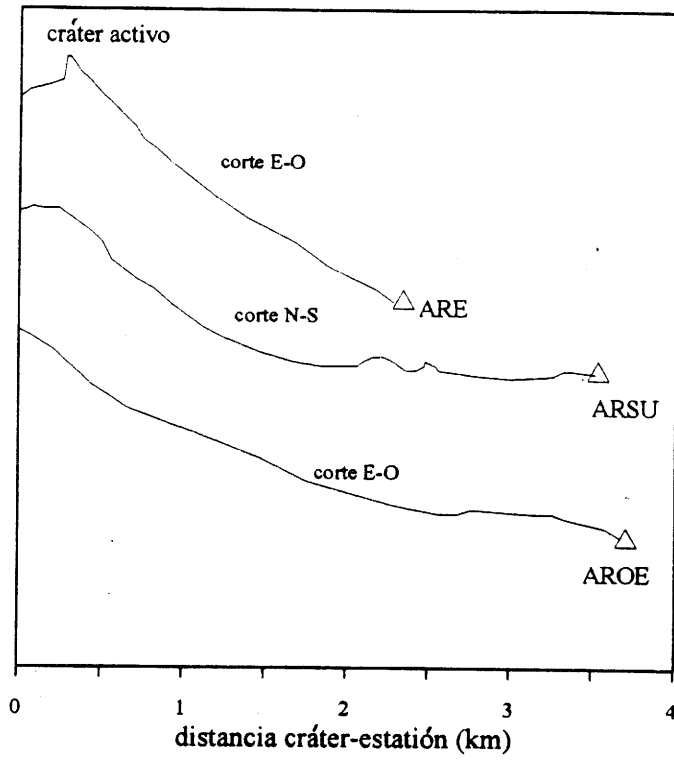


Figura 9: Cortes topográficos a lo largo de los perfiles entre el cráter y las estaciones sísmicas.

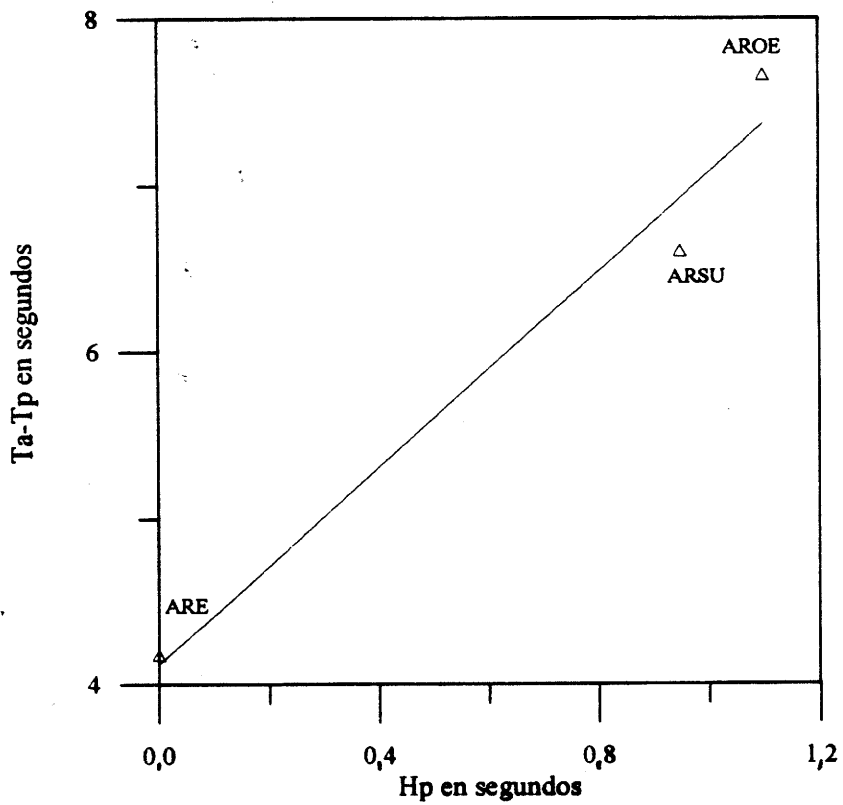


Figura 10: Variaciones de la diferencia de tiempo $T_a - T_p$, en función de la hora de arribo de las ondas P.

una sucesión continua de temblores de tipo volcánico (cf. Latter, 1979; Seidl *et al.*, 1981; Fehler, 1983). McNutt (1986) muestra también que, en el volcán Pavlof, los sismos volcánicos, las explosiones y los trémores tienen características comunes. Gordeev (1992) sugiere que los temblores de baja frecuencia son producidos por variaciones de presión o por explosiones en la parte superficial de los conductos del edificio volcánico y muestra que las explosiones volcánicas generan principalmente ondas superficiales.

Los resultados del análisis de los sismos volcánicos, de las explosiones y los trémores del Arenal concuerdan con estos trabajos. Los espectros de las explosiones y los temblores son muy parecidos y contienen picos a frecuencias de 0,65, 0,85 y 1,35 Hz. Estos picos existen también en los espectros de trémor que incluyen además un pico a 1,20 Hz. Alvarado & Barquero (1987) evidenciaron

también estas frecuencias en espectros de trémores. La semejanza del contenido espectral de los distintos tipos de evento sugiere que sus fuentes tienen propiedades muy similares. La semejanza de la forma en los sismogramas de temblores volcánicos y de algunas explosiones, que se distinguen sólo por la presencia de la fase acústica, corrobora esta conclusión. Se puede interpretar los picos de los espectros como debidos a efectos de resonancia de conductos o cavidades llenos de fluidos (magma, gases o agua). Las fuentes de los distintos tipos de evento excitan estos resonadores de diferente manera, según sus localizaciones y sus procesos físicos. En particular, las diferencias observadas en las amplitudes de los registros de temblores volcánicos y de explosiones puede explicarse por la posición de las fuentes a diferentes profundidades, o por diferencias de duración, o de energía de las fuentes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en el cuadro y con el apoyo del Programa Regional de Cooperación Francesa para la Prevención del Riesgo Volcánico en América Central. Agradecemos a Salvador Guadamuz R. por las correcciones que hizo a la versión española de este artículo. La Oficina de Sismología y Vulcanología del Instituto Costarricense de Electricidad brindó apoyo logístico para el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- 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.
- Barquero, R. & Soto, G., 1990: Reporte de la actividad del volcán Arenal, enero-junio 1990. *Bol. Obs. Vulc. Arenal*, 3(5):1-3.
- Barquero, R., Alvarado, G.E. & Matumoto, T., 1992: Arenal Volcano (Costa Rica) Premonitory Seismicity. *In* Gasparini, P., Scarpa, R. & Aki, K. (Eds.): *Volcanic Seismology*. IAVCEI Proceedings in Volcanology 3:84-96.

Felher, M. C., 1983: Observation of volcanic tremor at Mount St. Helens volcano, *J. Geophys. Res.*, 88:3476-3484.

Gordeev, E.I., 1992: Modelling of volcanic tremor wave fields. *J. Volc. Geotherm. Res.*, 51:145-160.

GVN, 1990: Volcán Arenal. *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 15,4:5.

Latter, J. H., 1979: Volcanological observations at Tongariro National Park, 2, Types and classification of volcanic earthquakes, 1976-1978. Rep. 150, N. Z. Dep. of Sci. and Ind. Res. Geophys. Div., Wellington, New Zealand, 60 pp.

McNutt, R.S., 1986: Observations and analysis of B-type earthquakes, explosions, and volcanic tremor at Pavlof volcano, Alaska. *Bull. Seism. Soc. Am.* 76:153-175.

Minakami, T., Utibori & Hiraga, S., 1969: The 1968 eruption of the Arenal volcano, Costa-Rica. *Bull. of the Earth. Res. Inst.*, 47:783-802.

Morales, L.D., Soley, J., Alvarado, G., Borgia, G. & Soto, G., 1988: Análisis espectral de algunas señales sísmicas de los volcanes Arenal y Poás (Costa-Rica) y su relación con la actividad eruptiva. *Bol. Obs. Vulc. Arenal.* 1(2):1-16.

Seidl, D., Schick, R. & Riuscetti, M., 1981: Volcanic tremors at Etna: a model for hydraulic origin. *Bull. Volcanol.*, 44:43-56.

LAS POSIBLES ERUPCIONES DEL VOLCÁN ARENAL EN 1915 Y 1922

Gerardo J. Soto, Guillermo E. Alvarado & Luis A. Madrigal

Oficina de Sismología y Vulcanología, ICE, Apdo 10032-1000, San José, Costa Rica.

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.

RESUMEN

Informes periodísticos y en revistas de principios de siglo sugieren que el volcán Arenal tuvo un par de cortos periodos eruptivos, en febrero de 1915 y en octubre de 1922. Consideramos como supuesta la erupción de 1915, y casi como un hecho la de 1922, con cierto margen de duda, con base en las testificaciones documentales disponibles.

ABSTRACT

Some accounts appeared in newspapers and magazines in early 20th century suggest that Arenal volcano had a couple of short eruptive periods, in February 1915 and October 1922. We consider the eruption of 1915 as supposed, and almost as a fact the 1922 one, with some dubious margin, based on the available documentary testimonies.

INTRODUCCION

El volcán Arenal es mundialmente conocido por su actual periodo eruptivo que dilata más de veinticinco años, y por sus detallados estudios geológicos y vulcanológicos, en particular referente a su espesa secuencia de tefras eruptadas en los últimos 3000 años. Así, previo al inicio de su nueva fase explosiva el 29 de julio de 1968, se ha hablado de un largo periodo de inactividad de más de 450 años (Melson & Sáenz, 1973) o de más de un siglo (Borgia *et al.*, 1988). Los informes periodísticos y en revistas de principios de este siglo sugieren, sin embargo, que quizás el Arenal pudo tener un corto

periodo eruptivo, ya sea en 1915 o en 1922, o en ambos. Con base en las observaciones de campo sobre el pasado geológico del volcán, es seguro que numerosos y pequeños periodos eruptivos han sucedido entre los grandes eventos explosivos, quedando poco o nada de material documentable -esto es: tefras o documentos escritos-, para incluirlos dentro de la secuencia eruptiva del volcán. A continuación expondremos lo más relevante de los documentos citados sobre las posibles erupciones de 1915 y 1922, nuestra interpretación y una discusión general.

EL SUCESO DE 1915

Documentos

Don Ricardo Fernández Peralta

escribió en la Revista de Costa Rica (Fernández, 1920) sobre su intento de dar explicación a unas erupciones volcánicas

observadas desde la cima del volcán Poás con rumbo hacia el noroeste:

"Eran las 8 de la mañana del 5 de febrero de 1915, hacía dos días nos hallábamos en la cima del Volcán Poás, el profesor don J. Fidel Tristán, el botánico don Otón Jiménez y yo, observando la gran actividad del volcán que se había iniciado el 8 de octubre de 1914 con una gran erupción de lodo; cuando súbitamente vi elevarse de un punto de la cordillera que se extiende al N.O., una columna al parecer de lodo y de vapor de agua. Comprendí inmediatamente que se trataba de una erupción volcánica y así se lo manifesté a mis compañeros quienes conmigo se pusieron en observación, esperando que se repitiese el fenómeno. No fue en vano, pues pocos minutos después de la observación que yo había hecho, vimos una gran columna negra en el mismo punto e igual a la anterior. El fenómeno se repitió de nuevo, pero en vez de una columna fueron tres simultáneas; poco tiempo después la cordillera se nubló y no fue posible observar más. Era lógico pensar en la existencia de un nuevo volcán en la región de Palmira, que por la naturaleza de sus erupciones debía semejarse al Volcán Poás."

El 22 de marzo de 1915 partió don Ricardo Fernández Peralta en compañía de otras dos personas y dos guías con rumbo a Palmira Sur, en donde ellos suponían que debía de localizarse el volcán. Sin embargo, la exploración de varios días por dicha región (Toro Amarillo, volcán Viejo, Platanar, Porvenir, Aguas Zarcas y otros sitios aledaños) en busca del volcán activo, resultó infructuosa. En su artículo, Fernández Peralta concluye:

"Las erupciones que observamos desde el Volcán Poás el 5 de febrero, fueron producidas por el Volcán Rincón de la Vieja, como lo prueba el señor profesor don José Fidel Tristán en su interesante artículo publicado en el diario *La Prensa Libre* del 28 de abril de 1915, del cual tomo las siguientes líneas:

"Hace algún tiempo se publicó en *La Información* que el señor don Ricardo Fernández Peralta y yo habíamos visto del cráter del Volcán Poás simultáneamente con una erupción bastante grande, otra en las lejanas serranías que se divisan hacia el N.W. del borde sur del mismo cráter. Este fenómeno ocurrió a las 8 y 8 minutos de la mañana del 5 de febrero, habiéndose repetido el mismo fenómeno, sin erupción concomitante, dos veces.

Por ser bastante desconocida, desde el punto de vista geológico y orográfico todas las elevaciones que forman la terminación de la cordillera de Tilarán y por hablarse con insistencia desde hace mucho tiempo de los volcanes activos Cacho Negro y La Vieja, el señor Fernández resolvió recorrer toda la región dudosa con el fin de obtener datos más precisos.

El señor Fernández Peralta descubrió varios cráteres muy antiguos y en uno de ellos varias solfataras ya apagadas, evidentemente de muy reciente formación, pero no descubrió ningún cráter activo. El fenómeno que vimos desde el Poás quedó, pues sin explicación. En mi carácter de Secretario del Centro de Estudios Sismológicos, dirigí una comunicación al señor Gobernador de la Provincia de Guanacaste, en la que le preguntaba el estado de los volcanes del norte.

El señor Gobernador tuvo la

amabilidad de enviar el siguiente telegrama:

"Secretario del Centro de Estudios Sismológicos".

"El señor Atiliano de la O, manifiesta que a principios de febrero o a fines de enero últimos, cayó ceniza en el barrio de Quebrada Grande situado en la falda de la cordillera entre los volcanes Rincón de la Vieja y Orosí, pero nadie ha visto de dónde salió la erupción."

F. Mayorga R., Gobernador.

La fecha de nuestra observación, el 5 de febrero, concuerda con la caída de ceniza en un punto situado entre el Volcán de la Vieja y Orosí. El fenómeno, pues, debe referirse a alguno de estos dos volcanes y para dilucidar la cuestión, es indispensable recordar, aunque someramente, los datos que existen de aquellos volcanes. Por los datos expuestos, me inclino a creer que las elevadas columnas oscuras que se vieron desde el Poás fueron erupciones del Rincón de la Vieja."

Comentarios

Dada la seriedad científica y experiencia en la observación de fenómenos naturales por parte de los profesores Fernández y Tristán, resulta muy probable que ellos efectivamente hayan observado una erupción, pero ¿asociada con un volcán y cuál?. Aunque resulta muy probable que el volcán Rincón de la Vieja haya tenido un período de actividad en 1915 -tal y como parece confirmarse por el telegrama enviado-,

resulta imposible que ésta fuera observada desde el Poás. Por nuestra experiencia, podemos decir que los volcanes de la Cordillera de Guanacaste no son visibles desde la cima del Poás, y sólo en un excepcional día claro, y con una columna piroclástica de considerable altura (más de 5 km por ejemplo) proveniente del Rincón de la Vieja, ésta podría ser divisada desde allí. En su artículo, don Ricardo Fernández es claro en puntualizar que "vi elevarse de un punto de la cordillera que se extiende al N.O.", de modo que no vieron solamente la columna piroclástica y de gases aislada, sino que aparentemente además observaron el punto de emisión. Por otro lado, del informe se desprende claramente que no se encontraron indicios de actividad eruptiva en la región de Palmira, y además ésta debió de haber sido reportada por los pobladores. Por ejemplo, se excluye de que se tratase de actividad fumarólica intensa o explosiones freáticas en la zona geotérmica del volcán Viejo, dado que Bajos del Toro ya estaba poblado en ese entonces y la expedición tampoco localizó indicio alguno. Los autores aludidos enfatizan lo poco conocida que era en ese entonces la Cordillera de Tilarán. En este sentido, tan sólo nos queda una posibilidad: que se tratase del volcán Arenal, el cual se puede ver perfectamente desde el mirador del Poás y alrededores, bajo condiciones climáticas óptimas. Parte del cono pudo haber estado envuelto en nubes y tan sólo sobresalir la cima y la pluma eruptiva, lo cual es una situación normal en el Arenal. La omisión de mencionar al Arenal podría deberse a que este volcán era prácticamente ignorado, científica y geográficamente hasta 1937 -como paradoja, mostramos sin embargo a continuación, documentos periodísticos de 1922-, cuando se realizó el primer ascenso documentado a su cima.

EL SUCESO DE 1922

Documentos

Una serie de telegramas fueron dirigidos al Subdirector General de Telégrafos con copia al Prof. José Fidel Tristán entre los días 20 y 21 de octubre de 1922.

El día 20 se reporta desde Florencia: "Atemporalado y temblando con frecuencia y se ve como una erupción (sic) del lado del Cerro del Arenal por la cordillera al lado de la frontera de Nicaragua".

Para el día 21 un telegrama desde Buena Vista da más información al respecto: "Desde hace días he venido notando la existencia de un nuevo volcán en el Cerro del Arenal que queda hacia el Noroeste de este lugar, según fenómenos presenciados. Gruesas columnas como de humo salen de la cúspide de dicho Cerro dando a veces un panorama imponente al espectador. De Villa Quesada saldrá el Sr. Ricardo Quesada con compañeros a la exploración del sospechado volcán. Hay alarma".

Ese mismo día aparecen las primeras noticias periodísticas al respecto:

La Noticia, diario de la tarde (sábado 21 de octubre, 1922): -DE ÚLTIMA HORA- "Aparece un nuevo volcán. Está en actividad"

"Esta tarde nos comunicaron de Alajuela que en Arenales, San Carlos, apareció esta mañana convertido en volcán un cerro que queda a poca distancia de ahí. El nuevo volcán ha hecho su debut

estruendosamente, esto es, arrojando lava y retumbos furibundos, por lo que los vecinos de San Carlos están alarmadísimos".

La Nueva Prensa (sábado 21 de octubre) acota entre otros párrafos similares: "...Hay gran erupción en el cerro (sic) del Arenal, la iluminaria es imponente. Desde gran distancia se puede observar... El elevado cerro arroja gruesas y elevadas columnas de humo que a veces es tan rojizo que parece sea fuego lo que sale de sus entrañas..."

El Diario de Costa Rica del día 22 amplía la información substancialmente, del cual se extractan los siguientes párrafos:

"Entró en erupción el Cerro Arenal" y "Violentos temblores se dejan sentir en todo S. Carlos, el río del lugar arrastra aguas sulfurosas y cae ceniza y arena sobre los pobladores".

"Ha aparecido un cono eruptivo en el Cerro del Arenal. Violentos temblores se sienten en toda la región de S. Carlos, los vecinos de las poblaciones más próximas al Cerro están alarmados".

"El río Arenal que discurre al pie del Cerro de este nombre, ha tornado sus aguas oscuras, como las del río Sucio, y arrastra azufre cuyas emanaciones se sienten a larga distancia. De este lugar ha salido una comisión que encabeza el Sr. Ricardo Quesada. También saldrán comisiones de otros lugares. Informaré detalladamente lo que vaya acaeciendo".

"De Buena Vista, Aguas Zarcas, Florencia y Muelle de S. Carlos, avisan que el volcán arroja grandes columnas de humo, a su vez, comunican que en la noche del viernes, entre las 20 y 22 horas, se desarrolló una serie de temblores, también sentidos aquí, observando, no sin extrañeza, que el Cerro del Arenal situado al N.O. de esas poblaciones, que es un elevado monte cónico y escarpado arroja grandes columnas de humo negro. Esto viene ocurriendo desde hace cuatro días".

"Personas que llegan de caseríos próximos al volcán, dicen que está cayendo sobre esos poblados gran cantidad de ceniza y arena. De noche las erupciones del volcán son imponentes, es un verdadero cosmorama. El Cerro del Arenal es un volcán apagado desde hace cien años y ahora abre nuevo cráter que está en ignición"

"Los vecinos próximos al Arenal dicen que desde hace quince días vieron las primeras erupciones volcánicas del Cerro. Según ellos, nunca se había visto nada semejante de cuando en cuando levanta bocanadas de humo, unas veces en columna que eleva a gran altura, otras las esparce en la cúspide del mismo cerro, dando un bello espectáculo".

"Los principales temblores han ocurrido los días catorce, dieciséis y diecinueve".

Y días después, como ampliación a las ya publicadas noticias periodísticas, aparece:

Diario de Costa Rica (Primera plana, miércoles 25 de octubre, 1922):

"El Cerro Arenal sigue en erupción, tembló el lunes en la noche"

"Sigue dando por la noches un espectáculo grandioso al lanzar grandes columnas de humo acompañadas de resplandores. Avisan de Florencia y Buena Vista que en esos lugares tembló fuerte el lunes en la noche. La comisión de Ricardo Aguilar no ha regresado".

Estas son las últimas noticias que aparecieron del fenómeno, pues no se encontró ninguna otra referencia en los diarios del país al respecto, ni ningún otro comentario o nota en los folios inéditos del Prof. José Fidel Tristán. Otros periódicos de la época, como La Prensa, El Heraldó (de Puntarenas), La Verdad (Diario católico), El Viajero (bisemanario de Puntarenas), ni siquiera publicaron una línea al respecto. Peraldo (1995) tampoco reporta indicio adicional alguno.

Comentarios

Las descripciones hablan por sí solas (más aún si se les compara con la actual fase eruptiva), con lances de cenizas, incandescencia nocturna, temblores en ciertas épocas, y posibles lahares de poca monta (se habla de ríos crecidos, con aguas oscuras y sulfurosas). La erupción se habría iniciado a principios de octubre, aunque la fase más importante se dio hacia el día 20, en tanto que los temblores de los días 14, 16 y 19 serían claros precursores a la actividad eruptiva más intensa. El hecho de que se escriba sobre "humo negro", confirmaría la presencia de ceniza en las bocanadas eyectadas, aunque los "resplandores" e "iluminaria" acompañantes no necesariamente serían material incandescente, sino que podrían ser relámpagos debido al disturbio atmosférico concomitante, o bien fumarolas de alta temperatura.

Desgraciadamente, nunca llegó a salir publicado el informe de la comisión investigadora, por lo que se carece de un comunicado de prensa directamente emanado por observadores ubicados al pie del volcán.

De hecho en esa época, las poblaciones existentes en el área eran las mencionadas Buena Vista, Aguas Zarcas, Florencia y El Muelle, un poco lejos del volcán. El principal centro poblacional era Villa Quesada, de donde surgen el grueso de los datos publicados en los periódicos. Pero "la Villa" queda a 33 km de distancia del volcán, y salvo días de buen clima -cosa que no fue el caso, según los telegramas- el volcán no se ve desde allí, y además está contra viento (hacia el sureste), por lo que la ceniza normalmente no alcanza ese poblado,

sino en condiciones excepcionales. Queda pues, una gran pregunta abierta respecto a la absoluta y total veracidad, la magnitud, su duración y consecuencias en los alrededores de esta erupción. La duda se acrecenta en tanto que además, el mismo citado *Diario de Costa Rica*, con fecha 5 de octubre de 1922, publica el título en primera plana "Ayer hizo una gran un en erupción el volcán Barba", acotando en el texto que "Ayer durante todo el día, estuvo en erupción el volcán Barba". Sabemos que este hecho no es cierto, por lo que nos resulta difícil discernir cuáles y hasta qué punto las descripciones del Arenal son totalmente reales y veraces, y cuáles son producto de la fantasía o sensacionalismo periodístico de la época.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Hasta hace varios años hubiese resultado inconcebible el dar cabida a la idea de que el Arenal hubiera estado activo a principios de siglo, dada la ausencia de documentación y a la espesa vegetación que cubría su cráter cuspidal, a juzgar por las fotografías aéreas, filmaciones, narraciones de testigos y escritos. Curiosamente, en uno de los párrafos citados supra, del *Diario de Costa Rica* del 22 de octubre de 1922, dice literalmente que el Arenal "es un volcán apagado desde hace cien años", esto es, desde principios del siglo XIX. Borgia *et al.* (1988) indujeron que la última erupción lávica debió ocurrir entre los siglos XVII y XVIII, lo cual hace coincidentes ambas referencias. La cita del periódico, **empero**, no sabemos si hace uso de una memoria oral ancestral, o bien es sólo un eufemismo para recalcar (cien años es mucho tiempo en la memoria colectiva) el hecho de que no se le conocía erupción.

La primera ascensión documentada al

volcán Arenal fue el 24 de febrero de 1937 (Trejos, 1959), tan sólo 22 y 15 años después de la supuesta actividad de 1915 y 1922, en la cual sólo se menciona actividad fumarólica tenue y nos pinta un bosque moderadamente desarrollado en el cráter. Sin embargo, nuestra experiencia a lo largo de más de diez años en esta región de clima tropical lluvioso, nos indica que una vegetación boscosa espesa puede desarrollarse en diez años, con árboles y arbustos de consideración, en particular sobre depósitos volcánicos inconsolidados, principalmente tefras de caída, dado que las de flujo son menos adecuadas edafológicamente. Estos materiales, con pocos ácidos, granulometrías relativamente finas y de composición intermedia, son susceptibles de cierto grado de evolución edáfica. En forma menos rápida, pero aun sorprendente, existe una colonización vegetal sobre las lavas en bloques (v.gr.: sobre las lavas recientemente eruptadas, donde hay una colonización de 16 nuevas especies en 25 años, con árboles de

hasta 6 m de altura: cf. Vargas *et al.*, 1993). Además, bajo las condiciones de pluviosidad a que es sometida esta zona, los depósitos de cenizas de algunos milímetros o aun centímetros de espesor, pueden ser barridos fácilmente en pocos días o semanas, de modo que los pocos restos que queden, son rápidamente mezclados con el suelo y casi se borra cualquier evidencia de erupción. Por ejemplo, existen algunas delgadas capas de ceniza y lapilli entre las unidades de tefras distales, y entre las capas de caída ET1 (julio de 1968) y la UN10 (1525? d.C.) (véase Chiesa, 1987 y Ghigliotti *et al.*, 1993), o espesos niveles de lapilli acrecional bajo los depósitos de la erupción de 1968, a unos 3 km al oeste del volcán, cuya fecha de eyección desconocemos.

Carecemos de más elementos de juicio (*v.gr.*: fotografías, reportes orales de testigos de las erupciones, el informe de la comisión de 1922) para aseverar que dichas actividades eruptivas efectivamente ocurrieron, pero conforme nos hemos ido adentrando en el

pasado eruptivo del Arenal, éste se nos revela ser cada vez más frecuentemente activo que lo que se había supuesto en años anteriores.

En conclusión, podemos tomar como supuesta la erupción de febrero de 1915, y casi como un hecho la de octubre de 1922 en el Arenal, en vista de las testificaciones documentales a que nos hemos referido. Al respecto, Peraldo (1995) opina que la erupción de 1922 sucedió, y que el material eyectado fueron líticos arrastrados por fumarolas de alta presión. Quedan, no obstante, sin respuesta las preguntas sobre las características eruptivas, magnitud y mecanismos, áreas afectadas, duración, y otros, aunque con gran probabilidad fueron de pequeña magnitud. Todos los aspectos narrativos y estratigráficos expuestos nos llevan a considerar al Arenal como un volcán mucho más activo en función del tiempo de lo que hubiéramos supuesto hace un lustro, y a determinar la actividad biorregenerativa en esta zona, como de una alta velocidad.

AGRADECIMIENTOS

A don Oscar Tristán, hijo del insigne investigador don José Fidel Tristán, quien, al poner en nuestras manos material inédito y recolectado por su padre a principios de siglo, nos suplió algunos recortes de periódico casi inconseguibles y olvidados.

REFERENCIAS

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.

Chiesa, S., 1987: Estudio de las capas piroclásticas (tefras) del Volcán Arenal (Costa Rica), con énfasis en la Unidad 20. Informe interno, Dpto. de Geología, ICE, 73pp..

Fernández, R., 1920: En busca de un nuevo volcán. *Revista de Costa Rica*, I,(II):325-333.

Ghigliotti, M., Frullani, A., Soto, G.J. & Alvarado, G.E., 1993: Tefroestratigrafía, historia y ciclos eruptivos del volcán Arenal. Bol. Obs. Vulc. Arenal, 5(9-10):52-96.

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

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

Trejos, J.F., 1959: Geografía de Costa Rica. Imprenta Universal, San José, 347 pp.

Vargas, G., Cortés, V. & Zúñiga, W., 1993: 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, 1992.

AN ECONOMIC EVALUATION AND HUMAN PERSPECTIVE FOR A MODERATE VOLCANIC ERUPTION AT ARENAL¹

Norman Kerle

Department of Geography, University of Hamburg, (Geomatikum), Bundesstrasse 55,
Hamburg, Germany²

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.

ABSTRACT

Based on a volcanic hazard map of Arenal volcano, a risk evaluation has been conducted in the area. It showed that the most threatened area (zone A), comprising about 40 km², is only lightly inhabited by permanent residents (ca. 30 persons), but receives a large number of visitors (>300 people/day) because of its touristic attractions. Under unfavourable circumstances (for example on a weekend-day in the high season), up to 700 people could be exposed to the volcanic eruption in the proximal area. The total approximate value of the houses, land and animals in zone A is about US\$5,100,000.

The area around Arenal volcano is characterized by strong cultural development. It includes the La Fortuna town, situated in the less threatened zone B, with presently about 2,600 inhabitants and several isolated hotels. Hazard zone C mainly comprises the region west of the volcano, that is likely to be affected by heavy ashfall in case of a severe eruption.

A public opinion poll, taken from about 2% of the area's population revealed, that people still remember well the 1968 eruption and partly also the 1975 and 1993 ones. It also showed, that one third the people expect the next large eruption within the next 4-20 years.

The infrastructure in the Arenal area is far from an appropriate level. Especially the roads from La Fortuna to Ciudad Quesada and from El Castillo to Tilarán need to be improved. The same applies for the medical service because there is only a small clinic in La Fortuna and the next hospital is in Ciudad Quesada. The hazard education of the population needs also be improved. At the present day (October 1994) no emergency or evacuation plan exists.

RESUMEN

Basado en el mapa de peligros del volcán Arenal, se ha hecho una evaluación del riesgo en el área. Esta muestra que el área más peligrosa (Zona A), que comprende cerca de 40 km², está sólo levemente habitada por residentes permanentes (unas 30 personas), pero recibe un gran número de visitantes (más de 300 diarios) debido a sus atracciones turísticas. Bajo circunstancias desfavorables (por ejemplo un fin de semana de la época turística alta), hasta 700 personas podrían estar expuestas a una erupción en el área proximal. El valor total aproximado de las casas, tierra y animales en esta zona es de cerca de US\$5 100 000.

El área alrededor del Arenal se caracteriza por un fuerte desarrollo cultural, que incluye al poblado de La Fortuna, situado en la zona de peligrosidad B, con unos 2 600 habitantes y varios hoteles aislados. La zona de peligrosidad C comprende la región hacia el oeste del volcán, que estaría mayormente afectada por fuertes caídas de ceniza en el caso de una erupción severa.

Una encuesta de opinión pública, realizada en una muestra de cerca del 2% de la población, reveló que la gente todavía recuerda bien la erupción de 1968 y parcialmente las de 1975 y 1993. También mostró que un tercio de la población espera la siguiente gran erupción dentro de los próximos 4-20 años.

La infraestructura en el área del Arenal está lejos de estar en un nivel apropiado. Especialmente los caminos entre La Fortuna, Ciudad Quesada, El Castillo y Tilarán, necesitan mejorarse. Lo mismo se aplica a los servicios médicos, porque sólo hay una pequeña clínica en La Fortuna y el hospital más cercano está en Ciudad Quesada. La educación de la población sobre el peligro volcánico también debe mejorarse. Al presente (octubre de 1994) no hay planes de emergencia o evacuación.

¹ This work was written in late 1994.

² Now at: Ohio University, 274 E 14th Ave., Columbus, Ohio 43201, U.S.A.

INTRODUCTION

Half of the International Decade of Natural Disaster Reduction (IDNDR) has passed. During the initial stage of this venture a list of tasks had been established. To prevent unnecessary loss of life and property as a result of future volcanic eruptions, the task group for Reducing Volcanic Disasters in the 1990's suggested a package of projects, which amongst others includes (for further details see Task Group..., 1990):

- * Hazard and Risk Mapping (this calls for volcanic hazard maps including up-to-date cultural features like towns, roads, schools, etc., as well as areas likely to be affected),
- * Public Education, and
- * Dialogue with Public Officials

The Arenal volcano was an almost perfectly cone-shaped stratovolcano with an altitude of 1633 m above sea level. Since the beginning of the recent eruption phase of Arenal in 1968, many researchs have been done here by national and several foreign institutions. Many of the practical works are limited to topics like field geology, petrology, volcanic seismology, tephrastratigraphy, volcano deformation, lahars, neotectonics, etc.

Therefore, other important studies, not necessarily being geological, are complementing the above while being a vital part of the Decade Program. One of these studies is the risk evaluation. Up until now, no thorough investigation of this kind (economic and human) has been conducted in the Arenal area.

As part of my geography study at the University of Hamburg, I spent two months (mid-August to mid-October) in 1994 in Costa Rica, interning there at the Office of

Seismology and Volcanology at ICE. Half of the time was spent on an evaluation, designed to assess the value of the area threatened by future potential eruptions of the Arenal. In the beginning, I attempted only to provide a detailed evaluational study of the area. This changed in the process as I later incorporated a public opinion poll which reveals important facts about the behavior, memory and awareness of the danger of the people living in the Arenal's vicinity. A summary of these different studies is reflected in a list of advice for the National Emergency Commission.

Previous works

Since the sudden eruption on July 29, 1968 the Arenal has been an object of great scientific interest. Being an open-air laboratory, the volcano provides endless opportunities for a wide range of geological, volcanological, seismological, biological and geographical studies, which are reflected in a large number of publications in the last 27 years. The first works only compiled facts about the volcanic activity and the course of events during the first days and weeks of the 1968 eruption (Melson & Sáenz, 1973). This changed over the time as later more detailed geological mapping (Borgia *et al.*, 1988) as well as geophysical and geochemical investigations (Reagan *et al.*, 1987, Alvarado *et al.*, 1988) were carried out in the area, all of which contributed to a much better understanding of the geodynamics at Arenal. However, tephrastratigraphical studies in the past years improved the knowledge about the last important volcanic eruptions (Ghigliotti *et al.*, 1993). Based on the latest research and also regional geology, a new hazard map has been drawn by the ICE's and Italian geoscientists, on which this work is based

(Geotermica italiana-ICE, 1992).

These intensive studies gave more insight in the Arenal's cycle of activity than there had ever been before. Prior to the study it had been generally assumed that the 1968 eruption had been preceded by 450 years of repose. Then in addition to the pyroclastic flow deposits dated in 1520 ± 20 AD (Melson & Sáenz, 1973), another recent volcanic event was found, being dated around 18th century, thus shortening the activity cycle drastically (Borgia *et al.*, 1988). Nevertheless several smaller eruptions are likely to have occurred since (*cf.* Soto *et al.*, this volume, pages 45-52). A serious problem is that all volcanic evidence in form of lapilli and especially fine ash and thin deposits seems to vanish in a short number of years, especially if the eruption had not been of a real significant magnitude, say, a plinian or subplinian type. This is mainly due to the heavy rainfall in this area with an annual rate of about 6000 mm. Altogether at least 11 major eruptions must have occurred in Arenal's history since 3,000 years, not counting the "minor" ones like the 1968 eruption, not preserved in the stratigraphic record (Ghigliotti *et al.*, 1993).

Even though 78 people were killed back then and an area of about 15 km² was devastated during July 1968 eruption, the ~1350 AD eruption (called ET2), for example, was about 6 times as voluminous during its explosive phase (Chiesa, 1987). All this adds to the controversy regarding the discussion about when the next big eruption is likely to be expected. If one takes into account only the main eruptions, then the ciclicity would be about 800 years, thus the next big blow was not to be feared before the year 2150 (Ghigliotti *et al.*, 1993).

Very important in that matter also is the new knowledge about the structure of the

volcano. Because of thorough research it is now easier to indicate zones of special weakness being a potential ground for future new craters. First of all there is the migration of activity along the Perdidos-Chato-Arenal axis, headed in NNW-direction (Alvarado *et al.*, 1988). A western trend is also well reflected in the creation of the 3 craters during the initial explosive phase in 1968, which are lined up perfectly on a narrow belt extending also toward a western direction. However, a thick pile of lava flows has been accumulated on the western slope due to the permanent activity since 27 years -thus strengthening the structure. Also the lava armor- and tephra apron shield on the eastern flank is considered to be relatively strong. That leaves the most likely spots for future activity on the lateral flanks north and south between the active crater C and the summit crater D. Under unfavorable circumstances, *e.g.* a strong earthquake, a landslide or avalanche could be triggered on the western slope, offering a spectrum of different scenarios as a result (*cf.* Geotermica italiana-ICE, 1992).

Hazard evaluation

As a result of intensive research, a new, thoroughly revised hazard map was completed by people in ICE (Fig. 1). All of the following data and results are based on that work. As always this only reflects our knowledge to the present day. As the insight in the future volcanic activity of the Arenal will raise in the next years, this will also affect the contents of this article.

As indicated, the area has been divided into 4 hazard zones (A to D). Zone A characterizes the form of the eruptions in 1968, 1975 and 1993. Because of the creation of 3 new craters on the western slope of the Arenal, which are located considerably lower in altitude than the summit crater D, all

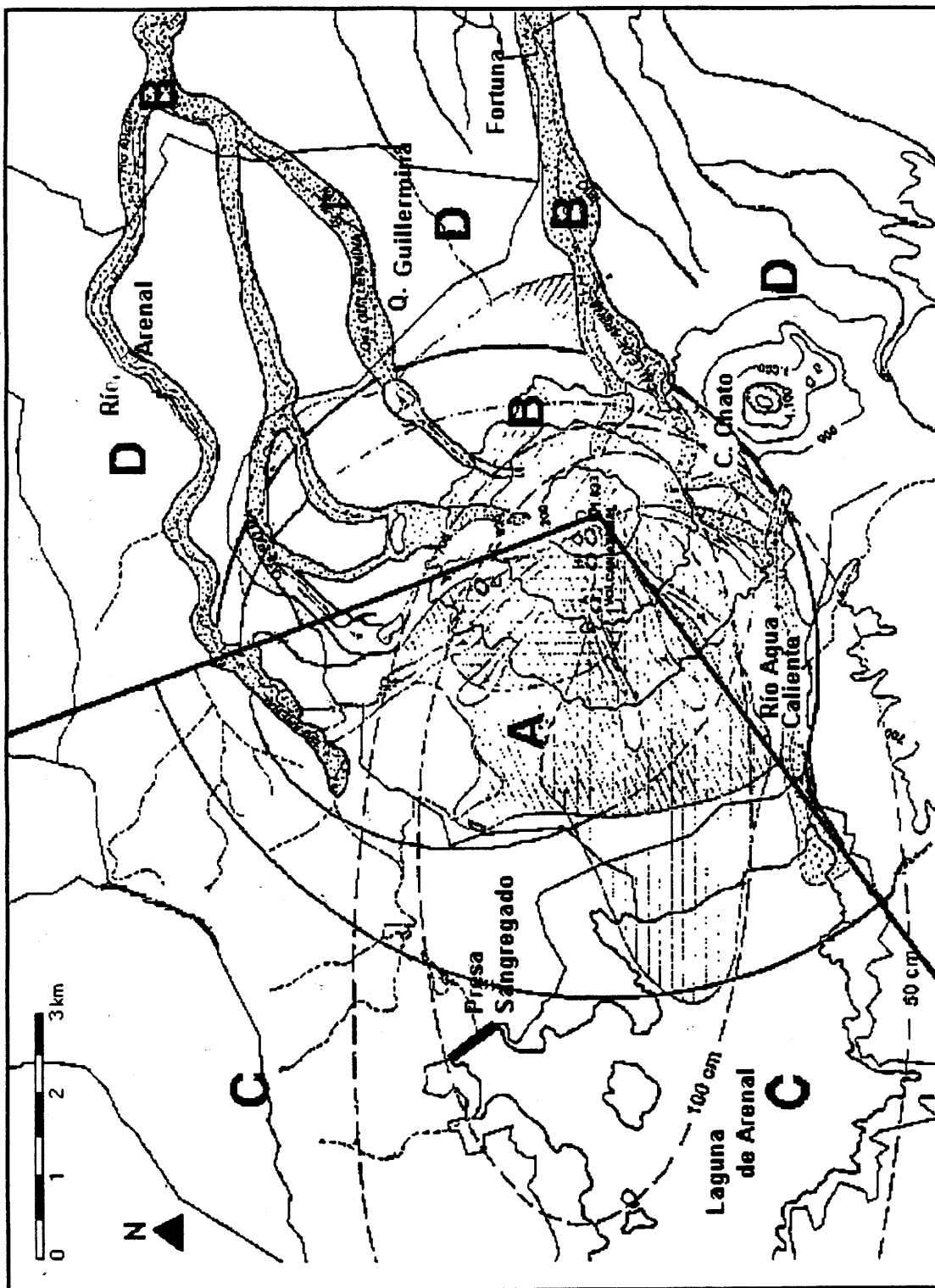


Fig. 1: Mapa de peligrosidad del volcán Arenal (largo plazo) A: Área de máxima peligrosidad. B: Alta peligrosidad. C: Mediana peligrosidad. D: Baja peligrosidad. Fuente: Geotermica Italiana-ICE, 1992.

explosive force was directed toward the west as a "lateral blast".

La Fortuna, being located in zone B, was slightly affected in 1968 only by thin ash deposits, but because of the existing creek of the Calle de Arena, the possibility of lahar flows exists in large events; likewise in the areas close to the riverbeds of Río Arenal, Quebrada Palma, Quebrada Guillermina, which are considered in the hazard map (*cf.* Zapata & Soto, 1990). However, a powerful eruption, enough to create lahars of an endangering size, seems to have a relatively low probability within the next 50 years. Therefore, the data is mainly limited to zone A, which is already threatened by smaller activity that could take place any day. Nevertheless, an evaluation has been carried out in zone B even if the data is less precise. Zones C and D are even less threatened.

Methodology

The first, theoretical approach was an evaluation of topographic maps of the concerned area (Arenal 3247 IV, Monterrey 3247 I, Tilarán 3247 III and Fortuna 3247 II) at a scale of 1:50,000. However, most of the maps were from the 1960's and had been updated in most cases only slightly in the 80's. The goal here was a preliminary arrangement of the area according to the individual danger zones. But it was also necessary to get an overall view of the region for the later field work. The next approach was a similar evaluation based on aerial photographs (National Geographic Institute, years 1971, 73, 75, 88 and 92). This photo sequence proved to be important, because it enabled me to assess the overall development of the area over time.

Two weeks were used for collecting data in the Arenal area, partly for the mapping of houses, infrastructure, etc., as well as for

questioning the inhabitants of the region (see chapter "Human perspective").

A public opinion poll was taken from 71 persons, living in places with different distances from the volcano and in different hazard zones. The poll included people of most ages (14 to 84 years), both sexes and with various occupations. Because of the short time, the number of people is comparatively low, representing 2% of the population. Nevertheless, it is sufficient to reveal the basic pattern of the public opinion. From the answers I intended to retrieve informations, like:

- * facts about the family structure as well as personal informations (*e.g.* age, sex, occupation, etc.) necessary for the data processing,
- * informations about the memory of the people regarding past eruptions of the Arenal,
- * informations about the awareness and anticipation of future eruptions,
- * facts about existing (or not) emergency or evacuation plans.

Further background informations of great importance were given to me at the headquarter of the National Emergency Commission (CNE) in San José, by volcanologists at ICE, and by people I talked to in the Arenal area, especially people who had been living in La Fortuna for a long time. Managers at several hotels close to the volcano provided also informations about the development of tourism in the region while giving an idea of the total number of tourists in the individual hazard zones. The rangers of the Arenal National Park contributed also to this work in a very helpful way. The later processing of the data was difficult due to the lack of a proper statistical computer program in this short time. Therefore, it became rather an accumulation of a large number of different correlations.

CHARACTERIZATION OF HAZARD AREAS

ZONE A

In Zone A (Fig.1) the land is most likely to be strongly affected by a smaller eruption or by a collapse of part of the crater. The concerned area comprises 40 km² of which 3.9 km² is forest (not counting smaller patches not indicated on the map -at an annual deforestation rate of currently 1.8% (this data is constantly changing anyway). In 1968 the two villages of Pueblo Nuevo and Tabacón, the first being located about 4 km from the lower crater, the latter being slightly closer, were severely affected. At the present time the area contains 16 houses of a total approximate value of about US\$63,000 as well as the Tabacón Resort (see next apart). Of the houses, 4 are weekend-houses, hence only inhabited during that time. Another 4 of the 16 belong to farms (*fincas*) and are used only for a few months every year. It also includes 3 *fincas* of a combined size of about 900 hectares. According to the statement of the

people living there, the value of the land is about ø150,000 a hectare or close to \$1,000 (the exchange rate in October 1994 being ø160 per US dollar). That value is comparatively low, probably because of the obvious danger it represents. Also the number of animals is relatively low (Table 1).

The approximate value of all houses, land and animals in zone A is at the present time a little over \$5.000.000. Given these figures and the value (which is altogether low for an area of this size), the best action would be to resettle all the people living in this area. The settlement behaviour in this area is characteristical, too. Of all the houses marked on the map in 1987, 19 do not exist anymore while 11 new ones have been constructed since. That means that few people have been living in this zone for a long time-thus simplifying a possible relocation.

TABLE 1: Properties and their value included in Zone A.

FEATURE	NUMBER	COST PER UNIT (US\$)	VALUE (US\$)
HOUSES	9	625 - 2,500	20,000
(includes farm houses)	5	2,500 - 6,250	25,000
	2	> 6,250	18,000
Total	16	--	63,000
FINCAS (only land)	3	1000/ha; 900 ha	900,000
ANIMALS			
Horses	34	200	6,800
Cows	333	450	150,000
Pigs	3	100	300
Total	370	--	157,100
Tabacón Resort	--	--	4,000,000
TOTAL VALUES			5,120,100

Tabacón Resort

The Tabacón resort, a tourist complex, was reopened around early 1993. Before that, since 1985, only a swimming pool and a restaurant used to be there. The resort is located at the intersection between the Tabacón river and the La Fortuna-Nuevo Arenal road, about 12 km from La Fortuna. Because of its closeness (approx. 3.5 km from the lower crater C), Tabacón resort represents an especially threatened object. The total complex comprises 80 hectares and includes the actual resort with several pools, a restaurant and gardens. The managers told me that already \$4 million have been invested in Tabacón, \$1 million of which was used to purchase the land (the value here is obviously much higher than on the western side). It is also planned to build a hotel close to the restaurant for an additional nearly \$2 million accommodation, for a maximum of 64 people. Even though Tabacón is an attractive place for tourists it is also exposed to the greatest volcanic hazard. The problem here is not as much the high value of the resort (which of course is the owners' risk) but rather the large number of visitors it attracts. For the short time the resort has been existing the daily number of visitors is already high and constantly rising.

During the last increased activity in August 1993, a pyroclastic avalanche was generated, one of the lobes reached about 3 km from the lower crater after descending the Tabacón valley, coming as close as 400 m to the resort. Because future pyroclastic flows are likely to travel the same preexisting (and well known) channels, Tabacón will continue to be exposed to high hazard in the near future. But asked for his opinion, one manager said, that *"the next big eruption will not take place for another 200 years"*. What they do not seem to realize is that a large eruption is not necessary.

They are hoping, however, that if they are hit by activity it will only affect part of the resort, mostly part of the (replaceable) garden. Keeping an eye on the visitor numbers this hope is understandable.

According to the manager's statistics, the average daily number in August 1994 was 220 visitors, slightly lower than the 270 people a day in July (considered high season because of the vacation time), and in our case is only showing the data for the low season. During the high season (December-May and July) up to 500 people have been recorded at one time. The normal daytime (10 a.m. - 6 p.m.) / nighttime (6 p.m. - 10 p.m.) distribution of the visitors is around 1:3. This reflects the entrance fee structure, being \$11 before 6 p.m. and \$6 after. The number of visitors as well as the daily amplitude vary with the day of the week and the season. Even the holiday structure in the U.S. and Europe influences both. The number of visitors from the States and Canada is highest from October to May, while most people from Europe come from July to December. From 1993 low season to 1994 Tabacón had already recorded a 40% increase in tourists. For 1994 high season, starting in December, an increase of at least 20-30% was projected, according to managers.

The number of people exposed to the volcanic hazard varies greatly over the day. The average distribution on a midweek day in the low season shows a peak that lies at 6 p.m., when the lower price starts to take effect. Mostly people staying at places near Tabacón visit the resort midweeks. Therefore, the number remains high until shortly before closure. There is a higher visitor number with a peak already around 4 p.m.. This corresponds with the fact, that most visitors from San José (mostly Costa Ricans, who pay only \$7) come to Tabacón on the weekends, but leave earlier to go back to the capital. But

also the drop at day's end is steeper, for the other people tend to stay longer.

Things look different in the high season. The peak midweeks is between 6 and 7 p.m.. The number of visitors decreases earlier, for the number of tour groups leaving earlier is higher. The weekends in the high season are the most crowded. With the peak rising sharply between 3 and 5 p.m. it is clear that the majority of the visitors comes from San José and leaves early.

The other swimming pools

Across the street from the Tabacón resort there is another hot spring pool, using the same waters. This place is barely developed, which is reflected in the lower entrance fee of \$1.6 in 1994. The distribution of the visitors is similar, though the number is much lower than in the Tabacón resort. Though the price is the same all day the small *balneario* is especially popular in the evenings. During the low season the average number of visitors on midweeks is between 50-60 a day. The distribution in the high season's midweeks is similar, only the number is with 90-100 a day higher. The distribution on the weekends is different, however. Many Costa Ricans living close by come here especially in the morning. People coming from San José do not contribute to the number of visitors (at least not to a noteworthy extent), which is approximately 150 a day in the low season and about 250 a day on the high season weekends.

About 1 km further west along the road is a third natural pool. This one is not developed at all and no fee is charged. It is still situated well within zone A, but is visited by few people only.

The Arenal Volcano National Park

The area around the western flank of the volcano is accessible to visitors. The entrance to the park lies about 3 km from the lower crater. For its permanent activity the Arenal attracts a constantly rising number of visitors, too. Though there is a warning sign about 500 m further (set up by ICE in mid 80s), urging people to not go any closer toward the crater, this is not enforced at all. In 1988, one tourist ignoring all warnings died while ascending to the crater, and another was severely injured.

The data shown in Table 2 were provided by a ranger at the park. Unfortunately the MIRENEM has started recording the visitors only since August 1994, making it difficult to assess the development. From the data for a few singular days it is obvious, that the number varies greatly, because on some days several buses arrive with a large number of tourists, making an average figure rather unrepresentative. Any future development is also very hard to predict. On October 1994, the Arenal area was declared a national park, which means a \$15 entrance fee for foreign tourists. Since the volcano is just as well observable from outside the park, a large number of foreign visitors is not likely to enter the actual park, though that does not remarkably lower the hazard.

The average number of visitors for August 1994 was already 428 per day, being slightly lower in September. The unstable visitor number per day over the month as well as the Costa Rican - Foreigner-imbalance can be emphasized by the sample in Table 2.

TABLE 2: Samples of national and foreign visitors to Arenal Volcano National Park.

DAY	NATIONALS	FOREIGNERS	TOTAL
Thursday, August 11	22	347	369
Friday, August 12	43	247	290
Saturday, August 13	286	359	645
Sunday, August 14	529	261	790
Saturday, September 24	94	70	164
Sunday, September 25	242	112	354
Average (\pm standard deviation)	203 \pm 176	233 \pm 109	435 \pm 214

Obvious is the high number of tourists on the weekends, with an especially high number of Costa Ricans on Saturdays. Due to the lack of time it was not possible to observe the distribution over the day over a longer time. The visiting pattern is quite similar to the ones of Tabacón, with a peak normally during the evening.

One exception is the high season weekends with two peaks. Many tourists from San José seem to arrive sometime in the early afternoon (it takes a bus between 3 and 4 hours to get there from the capital), causing the first peak, while going later to Tabacón, causing there the earlier stated peak between 3 and 5 p.m. The second peak at the Arenal represents the number of people staying in La

Fortuna or another place close by, coming later to see the volcano at night.

Endangered people in zone A

Since the data obtained during the fieldwork, we can calculate roughly, the total amount of people endangered into Zone A, assuming the worst scenario, while the highest visiting situation occurs, let say a weekend during the tourist high season (Table 3). A total of 69 persons includes permanent residents, Tabacón's workers and weekend residents. Adding the visitors to Tabacón Resort plus those to the other hot pools plus the visitors to National Park, we obtain some 700 persons vulnerably exposed to a volcanic eruption in this area.

TABLE 3: Endangered people into Zone A, a weekend of a high season.

PLACE	AMOUNT OF PEOPLE
RESIDENTS	
Permanent residents	29
Weekend residents	~10
Workers at Tabacón	~30
TABACON RESORT: visitors	~300
HOT POOLS: visitors	~50
NATIONAL PARK: visitors and rangers	~300
TOTAL	~700

ZONE B

As earlier described, zone B comprises the area that would be affected during a large eruption, mostly by lahars. Altogether Zone B comprises about 26 km², of which approximately 12.5 km² are covered with forest. It also includes 5.5 km paved road.

The area includes at least part of La Fortuna (together with Zeta-13 settlement and Tajo Manolo), La Palma, part of La Guaría as well as individual houses along the road between La Fortuna and Tabacón (see Fig. 1). It also includes the Arenal Observatory Lodge, a hotel only 2½ km SSW of the active crater. There are approximately 650 houses in zone B, about 40 of which are stores or restaurants without people living there. The total population is around 2,600 persons. There are also 2 gas stations, 4 schools, 4 churches and a clinic, the only one being close enough to the volcano to provide any help in case of an emergency - eruption of the Arenal.

The Observatory Lodge was built already about 6 years ago as one of the first

hotels in the area. So far about \$250,000 have been invested. The maximal capacity is 40 people in 15 rooms with an average occupancy rate of 15-20 people. Right now a new part is being added with 9 more rooms and a conference room (\$150,000 is being invested), for this place is frequently visited by foreign scientists who take advantage of the location of the hotel to study the volcano. Closer to the volcano than La Fortuna (with a number of hotels and cabinas) is the hotel Montaña del Fuego with 6 rooms for 18 people. By August, 1994, the hotel is about one year old and about \$45,000 have been invested. Also there are the small Cabinas Rancho (value around \$7,000) and the Cabinas Rossi, the latter with 16 rooms for up to 50 people (average 15) with a value of about \$160,000.

The explosion-like development in tourism since 1991 in La Fortuna is emphasized by the fact, that in 1990 only 4 hotels were in existence, today there being over 20 hotels and cabinas.

EMERGENCY PLAN

So far more than once it has been strongly emphasized, that the danger of an eruption in the near future, posing a high risk for zone A, is everything but little. Also it is no secret that normally volcanic eruption may be anticipated and substantially mitigated. But this can only work, if authorities make full use of hazard assessments provided by volcanologists.

So the open question was, whether the area around the Arenal, especially the most threatened zone is prepared for a future emergency. The eruption starting in 1968 came as total surprise, and authorities did not seem to be adequately prepared. The community of La Fortuna later complained, that the government had not reacted properly or too slowly. There was a lack of shovels, cars, food, blankets, etc.. Of course, there were many things to do at once. People were evacuated from all the surrounding villages, including 1,000 citizens of Cañas, some 60 km to the west. Also, due to the pollution of rivers with ash, wells had to be drilled.

The National Emergency Commission (CNE-Comisión Nacional de Emergencia) was founded already in 1963 as the Defensa Civil as a response to the eruption of Irazú in the same year. In 1983 it became the independent CNE. I was told that to the present day no emergency or evacuation plan is in existence.

The allover basis for the work of the CNE is the National Emergency Plan. Among other things it states, that all institutions and ministries that would be involved during an emergency (e.g. the ICE, CNE, fire brigades, water works, transport, communication, health, etc.), have to be part of the plan. That means, that for setting up a plan for the La Fortuna area representatives of all institutions

would have to meet at one time in one place. As it seems, the problem is a rather organizational one after all. Yet it has worked before, for 28 emergency plans already exist in different parts of the country. But there are several other obstacles. First of all the structure of the CNE is very complex (which seems to hinder efficient work). A local problem is, that the border between the provinces of Guanacaste and Alajuela cuts straight through the Arenal lake, thus dividing the affected area in two political divisions. That means that two local committees would have to work closely together.

A normal strategy for setting up a plan would be: The CNE establishes a number of subcommittees, that are responsible for:

- * Evacuation and rescue (fire brigades, Red Cross),
- * Communication (ICE),
- * Education (Ministry of Education),
- * Technics (Ministry of Agriculture),
- * Transport (Ministry of Public Transportation),
- * Volunteers (Red Cross),
- * Health (Ministry of Public Health),
- * Supply [of food, medicaments, etc.],
- * Security (local police).

Then a local committee would be created, including a coordinator, a subcoordinator, a secretary, a treasurer and an attorney. The local committee has to address the tasks for the individual subcommittees. It also defines a place, where the subcommittees have to meet in case of an emergency. Each subcommittee has its own emergency plan. All activities are coordinated by a General Coordinator. Representatives meet then once a month to discuss problems to improve the system. In case of the actual emergency, the CNE gets informed by the General

Coordinator and alerts the subcommittees. Then evacuation will be organized according to the preset working plans; provisional accommodation will be arranged, water and electricity supply checked and medical service and general supply coordinated.

All this sounds very well reasoned. Concerning La Fortuna, a local committee was created as an answer to the pyroclastic flow event in August 1993. They met once a month following the National Emergency Plan. Until December, when the committee ceased to exist (at least to exist to a notable degree). There was no money to finance any work; for 4

months everything had been on a voluntary basis but then slowly died out.

Also the necessary infrastructure is not existent. For airborne supply small landing fields in La Fortuna and El Castillo are only usable for helicopters. The next hospital is located in Ciudad Quesada, about 45 km from La Fortuna, connected by a road, that is partly in bad condition. The closest available fire brigade is also in Ciudad Quesada. The only positive sign is the road toward the east to Muelle via El Tanque, which has been improved in 1991, allowing a rapid evacuation of the immediate danger zone.

HUMAN PERSPECTIVE

During the field work 71 persons have been questioned. Altogether 15 questions were asked. After some personal inquiries (age, sex, occupation, family size [adults/children], size of property, number of different animals) more important questions followed, which were:

- * How many years have you been living here?
- * Have you been personally affected by the Arenal's volcanic activity?
- * Have any of your ancestors or family been affected in the past?
- * Do you remember any severe eruptions in the past? (the proper answer here would have been 1968)
- * When did the last bigger eruption occur? (choices here being 1975 and 1993, even though no answers were multiple-choice like offered)
- * When do you think the next severe eruption will occur? Choices: immediate (<4 years from now), short-term (4-20 years), medium-term (21-100 years), long-term (>100 years) and no eruption at all
- * How great do you think will the danger be for you personally? (none - little - moderate - great - very great)
- * Do you know of any evacuation plan by the government or the CNE for this area?
- * Do you have a car (or other means of

transportation)?

Besides asking these questions I talked to different people to learn more about the general thinking. The data from the answer sheets was then later processed and correlated to show any significant trends. For the correlation, the people were allocated in different groups mainly in 5 different ways:

- 1) general correlation of all persons answers,
- 2) according to the hazard zones,
- 3) depending on the age of the questioned persons,
- 4) depending on the time the person has already lived in the area,
- 5) according to the educational level.

1) General correlation

Of the 71 people, 13% have already been personally affected, while families or ancestors of 27% already suffered from Arenal's activity. The answers to the question concerning the 1968 eruption were actually longingly anticipated, for I thought to find the

old saying proved, that "lives and memories are short". But people who have witnessed the eruption still seem to remember vividly; if not only from having told stories about it many times. People who have not witnessed the volcanic blast, however, "remember" just as well, probably they were the ones the stories were told to. 75% of all recall the 1968 eruption, 55% of those with the precise year. The fact, that 20% could not give the exact year seems to prove the story-telling theory, for facts, not as much dates, are the contents of stories.

The last two pyroclastic avalanches (1975 and 1993) are much less well remembered. 56% could not give a date at all, while the dates recalled by another 16% were incorrect. Only the remaining 28% gave a correct date.

More than 33% expects the next big eruption to take place between the next 4-20 years (for the distribution of the answers regarding the next eruption see Fig.2). Most of the people who chose this answer, as is shown later, have been living in the area for less than 10 years. That means, they already witnessed one outbreak (August '93) while getting an idea about the power of the volcano. On the other side another third stated, that they do not expect a future eruption at all. This answer was mostly given by people who have been living in the area for a long time, enough time to getting used to the threat. Surprisingly it was also chosen by many people with above-average properties. Therefore, the answers seem rather like a wish, that there be no more eruptions, at least not in the questioned peoples lifetime. The answers to the danger-question were less significant. Still two peaks stand above the rest (Fig.3).

A little more than 25% of the people expect moderate danger. Moderate always

seems to be a good (even if undecided) answer to questions like this; some danger, but always of a still acceptable degree. If something happens, affected things can be replaced and life goes on. On the other side, however, more than one third of the people is more realistic by expecting very high hazard. Only 41% possess some kind of transportation for an evacuation.

The most surprising answers were, however, the ones regarding the evacuation-question. Some 14% claimed to know, that an evacuation plan indeed exists; in fact these people are being lulled by the CNE or the government into a false sense of security.

2) Hazard zone versus opinions

About 60% of the people in zone A recall the 1968 eruption, 40% of those gave the correct date. An above-average 40% remembered the avalanche in 1993. Living that close to the Arenal, people seem to have adapted some respect for the volcano- and also know about their vulnerability. 80% anticipate the next eruption by short-term means, 60% consider themselves to be in very great danger.

The memory, however, is better in all other zones, the best rate being 80% of the people in zone C, all of whom remembered the exact year. The percentages in zone B and D are with $\approx 75\%/50\%$ (exact year) about equal.

The answers to the question regarding the next eruption varied greatly in zone B. By far the most often chosen answer was "no eruption at all". The majority of the people in zone B are La Fortuna residents, most of which have lived in the area for a long time (>10 years). The wish, again, that their over time acquired prosperity be not affected, seems to be on many people's minds. This could be approved by the fact, that 53% of the people in zone C, who obviously feel the smaller danger,

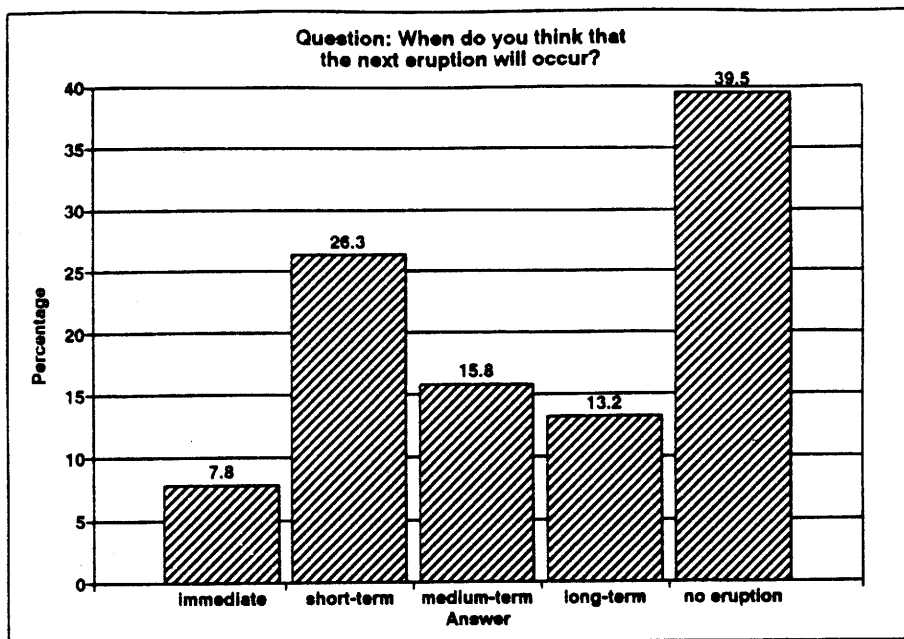


Fig. 2: People's expectation of the next eruption of Arenal.

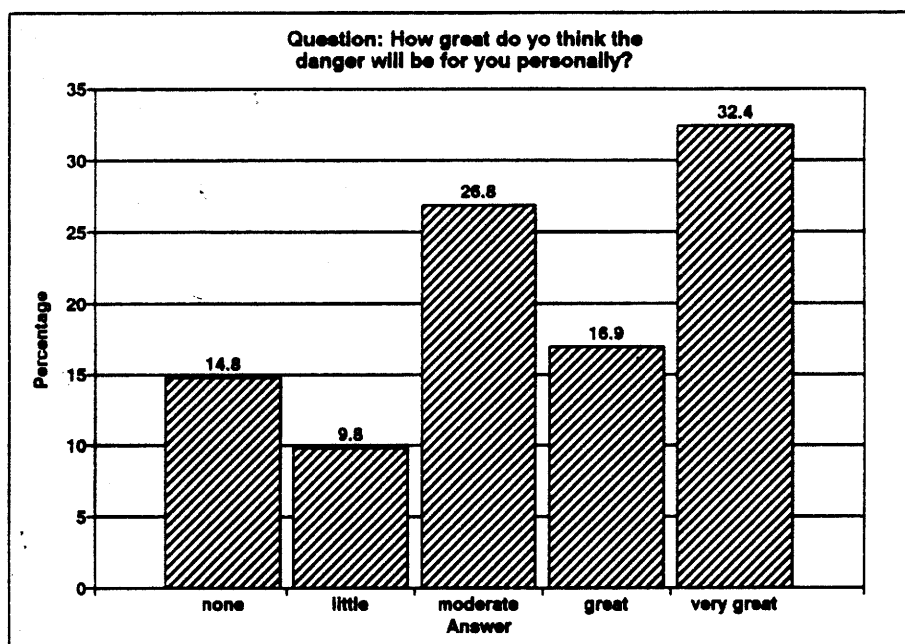


Fig. 3: Concern of the population about danger around Arenal.

expect the next eruption to take place within the next 20 years, only 20% said, there will be no eruption in the future.

Worth mentioning is the thinking about the danger in zone B. The distribution of the answers must be a result of the heterogeneity of zone B: 18% said no danger, 0% little, 36.6% moderate, 18.4% great and 36.6% said great danger. People living close to the earlier described, more endangered, riverbeds (see chapter "Hazard evaluation") sometimes live as far from the volcano as people in zone D, without realizing the hazard.

3) Age of people versus opinions

For an evaluation of the vision between the age of the persons versus the answers, 4 different age-groups were created: A) <30 years B) 31-40 years C) 41-60 years D) >60 years.

Most of the older people still recall the 1968 eruption, though in many cases not the correct year. Concerning the activities in 1975 and 1993, on the other hand, the knowledge decreases with age. So does the anticipation of another eruption by short-term means. Instead the "no eruption" attitude takes over. Older people, in general, tend to have a more decided opinion. Regarding the danger for themselves during a future eruption, none of the above 60-years old stated "moderate". The only interesting trend, however, is the constant increase of the "no danger"-attitude with age.

4) Length of time spent in the area versus opinions

The people were then allocated to different groups, depending on the number of years they have already spent in the area. For this 5 different groups (<1, 1-5, 6-10, 11-20 and >20 years) were created.

It is obvious, that people who have lived in the area between 6 and 10 years have the best overall memory. About 70% recall the 1968 eruption exactly, 43% the eruptions in 1975 or 1993, only 28% do not remember the last explosions at all. People who have lived in the area for more than 20 years also know more than average. 95% recall the 1968 eruption, 71% of those with the exact year. Though the memory of the last activity is less well preserved. This correlates with the worse memory, regarding the same questions, of older people (most people, who have lived here for over 20 years, are actually in age groups C and D). The anticipation of immediate hazard decreases sharply. Also the short-term answers lessen. Instead the "no eruption" attitude increases (another correlation with the age). In all people seem to lose their fear over the years.

In the danger-section the distribution of "very high" is striking. People with a history of only 1-5 years in the area quoted 52%. Again, they see the volcano exploding every day and have already had a chance to experience, what increased activity looks like. On the other side people who just moved to the region are very undecided (44% of group 1 stated "moderate"). Of the people, who have lived here for more than 20 years only 5% think of the danger as very high. Most seem to think, that they have already lived with the volcano for a long time and survived it. This attitude very well correlates with the 48%-statement for "no eruption" in the same group.

5) Educational level versus opinions

The educational structure in the Arenal area is quite heterogenous. I was eager to find out, to which extent the answers depend on the education. Allocating people to different educational levels, however, proved difficult. A proper basis for this would have been

knowledge about the peoples education rather than their occupation (e.g. a housewife could theoretically have an university degree). But people tend to not be honest about their education (for example, people with only 6 grades prefer to quote to have gone to school for 10 years). Therefore, only 2 different groups were created. The first includes persons with the following occupations:

- * housewife
- * chauffeur
- * farm hand
- * bricklayer (and similar occupations).
- * peasant
- * cowboy
- * cashier

Group 2 includes:

- * manager
- * storekeeper
- * office employee
- * teacher
- * guide
- * farm owner

The people in group 2 remembered past activities well. However, the answers regarding the next eruption and the danger it represents, were more surprising. People with less education expect the next eruption much sooner than the majority of group 2. The quote for short-term hazard stands 51% to 15%, on the other hand, the "no eruption"-attitude was with 33% to 31% equal. Either people with higher education know more about volcanic activity or think they do; or else they think that education shields them from danger. About 49% of the people of group 1 consider the danger as very high, whereas only 16% of the higher educated ones think so.

Two more correlations seemed to be

interesting. First, whether the opinions depend on the availability of a car in case of an eruption. Second, whether people who claimed to know about an evacuation plan really are being lulled into a false sense of security.

Only 40% of the people have some kind of transportation available in case of an evacuation, and the assessment of the danger obviously depends on it. Of all persons with a car 21% feel no danger at all, compared to 10% (people without a car). 21% think of the danger as very great, whereas 41% of the no-car-people think so.

About 14% of the total people know (or claim) some evacuation plan. Especially the imbalance of the "very great danger"-answers is striking. Only 20%, knowing about a plan feel a very great danger for themselves in the event of an eruption, whereas 68% with no knowledge (or faith in the government) feel so.

The answers were also correlated according to the absolute distance from the Arenal (not considering the different hazard zones). However, the graphs showed little significant, corresponding to the fact, that the nature of Arenal's activity is very well reflected in its two totally different faces. One of dense forest on the eastern flank, one looking like the the moon's surface on the western side. That means, that people have some kind of unconscious knowledge about the distribution of different dangers imposed by the Arenal.

DISCUSSION: A PROPOSAL FOR AN EVACUATION PLAN

Undoubtly, at the present time the community of La Fortuna is far from adequately prepared if things come to the worst. Little but effective things, that could be done to mitigate, do not require much effort, like:

- * an absolute stop of development in

zone A,

- * a study of the development of tourism in the future in the area.

However, the most important task is to set up an evacuation plan for the Arenal area,

which requires more effort (and money).

With the investment of comparatively little money the people at the present time living in zone A could be resettled. This should be done soon, for as earlier described the settlement behaviour in the area is unpredictable. That means, that the number of people living there could strongly increase in a short time. It is known that many people from Nicaragua have moved to the Arenal area recently, and more are likely to follow, looking for little-costing land. The number of people living here permanently seems insignificantly little compared to the possible number of about 700, that could be exposed to the hazard during an eruption. However, if preliminary signs would be noticed, indicating a possible severe eruption, visitors could be kept away from the most endangered zone. Still, the loss of property could not be prevented this way.

Also part of the infrastructure needs to be improved. This includes the road to Ciudad Quesada, the only actual lifeline in case of an emergency. All supply, medical service, even fire fighters would move on this road. The road on the southern side of the Arenal lake, leading to Tilarán, desperately needs

improvement as well. For now it is not even passable with a 4WD-car. The road represents the only evacuation route for the people of El Castillo, which is barely outside of zone A. Even though at the present time already about 280 people live there, El Castillo has neither a clinic nor a doctor. Plans exist only for a health station, which would be visited by a doctor once a month.

A second equally important task is the education of the population. People need to know more about the hazard as well as about the efforts of the government or other institutions to mitigate it. Talks with several inhabitants of La Fortuna have shown, that especially older people, people who just moved to the area and people without connections to tourism, know only little about the actual volcanic hazard.

Even though volcanic assessments have been conveyed to civil authorities, obviously no adequate action has been taken. But this negligence could prove fatal, for the toll in a next bigger eruption could be far higher than 78. The next pyroclastic flow could devour more than just the 16 houses or Tabacon's gardens.

ACKNOWLEDGEMENTS

I gratefully acknowledge all the people at ICE's Office of Seismology and Volcanology, especially Guillermo Alvarado for making this internship possible. Francisco Arias' assistance during the field work was a great help. I also thank Guillermo Alvarado and Gerardo Soto for their critical review of the manuscript, and Luis Madrigal for the graphics.

REFERENCES

- Alvarado, G.E., 1989: Los volcanes de Costa Rica. xviii + 175 pp. EUNED. San José.
- Alvarado, G.E., Matumoto, T., Borgia, A. & Barquero, R., 1988: Síntesis geovulcanológica del volcán Arenal (Costa Rica): 20 años de continua actividad eruptiva (1968-1988). Bol. Obs. Vulc. Arenal, 1(1):1-55.
- Borgia, A., Poore, C., Carr, M.J., Melson, W.G. & Alvarado, G.E., 1988: Structural, stratigraphic, and petrological aspects of the Arenal-Chato volcanic system, Costa Rica. Evolution of a young stratovolcanic complex. Bull. Volcanol., 50:86-105.
- Chiesa, S., 1987: La mayor erupción pliniana del volcán Arenal. Rev. Geol. Amér. Central, 6:25-41.
- Geotermica italiana-ICE, 1992: Evaluación del riesgo y monitoreo del volcán Arenal. Informe Final, 40 pp.+39 figs.+Anexo.
- Ghigliotti, M., Frullani, A., Soto, G.J. & Alvarado, G.E., 1993: Tefroestratigrafía, historia y ciclos eruptivos del volcán Arenal. Bol. Obs. Vulc. Arenal, 5(9-10):52-96.
- Melson, W.G. & Sáenz, R., 1973: Volume, energy and cyclicity of eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica. Bull. Volcanol., 37:416-437.
- 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.
- 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.
- Task Group for the International Decade of Natural Disaster Reduction (IDNDR), 1990: Reducing Volcanic Disasters in 1990's. Bull. Volc. Soc. Japan, Ser.2, 35(1): 80-95.
- 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.

MAFIC METAIGNEOUS LOWER CRUST BENEATH ARENAL VOLCANO (COSTA RICA): EVIDENCE FROM XENOLITHS

Peter M. Sachs¹ & Guillermo E. Alvarado²

1: Department of Volcanology and Petrology, GEOMAR, Wischhofstrasse 1-3, 24148 Kiel, GERMANY.

2: Oficina de Sismología y Vulcanología, ICE, COSTA RICA.

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.

ABSTRACT

Preliminary data suggest that the lower part of the crust beneath Costa Rica consists predominantly of basic metaigneous rocks. A preliminary geological crustal model for Northern Costa Rica is proposed, based on petrological data from crustal xenoliths of Arenal volcano, and compared with seismological data.

RESUMEN

Datos preliminares sugieren que la parte inferior de la corteza bajo Costa Rica consiste predominantemente de rocas metaígneas básicas. Se propone un modelo geológico preliminar de la corteza de Costa Rica del norte, basado en datos petrológicos de xenolitos corticales del volcán Arenal, comparado con datos sismológicos.

INTRODUCTION

The lack of a crystalline basement in Southern Central America has been argued for more than a century by several scientists (*cf.* Dengo, 1968; Weyl, 1969). However, seismological studies in the northern region of Costa Rica show that the crust is anomalously thick, about 43.5 ± 7 km (Matumoto *et al.*, 1977). Also Kussmaul *et al.* (1982), Carr (1984) and Montero *et al.* (1992) proposed a thick crust beneath volcanic ranges in Costa Rica, averaging 30-40 km in the northwest and ≥ 33 km in central Costa Rica. Matumoto *et al.* (1977), based on the comparison of different crustal structures of active margins of the Pacific, concluded that the origin for Southern Central America is not different from any other Circum-Pacific island arc or active continental margin. A major negative gravity

anomaly (between -20 to -80 mgal) occurs all over the Cordillera Central and may indicate a small isolated block of thick, low-density continental crust (Case, 1980).

Tournon (1984, p.109) reports the presence of andalusite micaschists in the Talamanca Range (Fila Bugú), but unfortunately it is unknown yet if they are the product of a deformation of sedimentary rocks during the intrusion of Miocene plutons, which crop out in the vicinity (Fig. 1). An unpublished very young K/Ar radiometric age shows a thermal effect during intrusion time (J. Tournon, oral com., 1990). In the same way, Tournon (1984, p.143) and Krawinkel & Seyfried (1994, p.54) found alluvial boulders of a foliated amphibolite in Osa Peninsula (Río

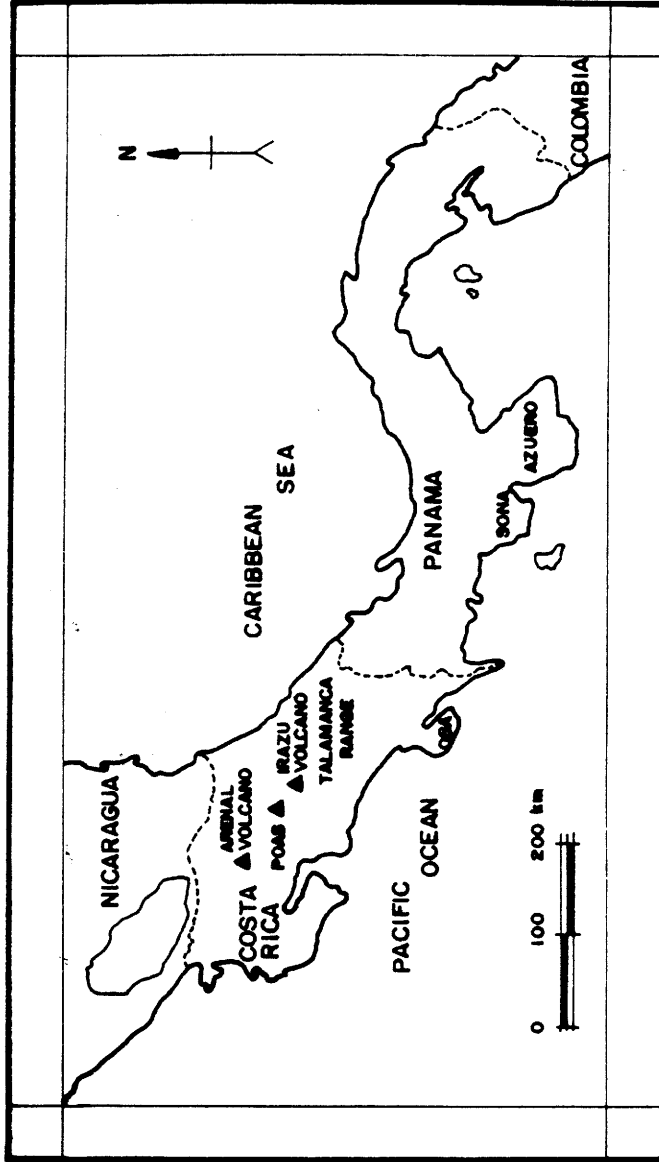


FIG. 1 : REGIONAL LOCATION MAP SHOWING THE MENTIONED SITES .

Madrigal and Río Claro, respectively) which unearths again the discussion about the existence of a metamorphic basement in Southern Costa Rica, similar to the one in Azuero Peninsula in Panama (Fig. 1), located 250 km to the East (Tournon *et al.*, 1989).

A preliminary study of xenoliths in recent volcanic deposits at Arenal volcano (Fig. 1), shows evidence for a possible metagabbroic basement beneath Costa Rican territory.

THE ARENAL XENOLITHS: CHEMISTRY AND MINERALOGY

Previous work at Arenal has focussed on enclaves of the current eruptive period (1968 to present) and some enclaves from the youngest prehistoric lava flows (the so-called "A2" unit, erupted probably between 1525 and 1800 A.D.). Cigolini and Kudo (1987) reported olivine gabbros, anorthosites and rare pyroxenites and tonalites. Beard and Borgia (1989) studied gabbro enclaves.

We have studied xenoliths from the tephra sequence of Arenal erupted during the last 3000 years. In this paper we describe granulite xenoliths from the ET-3 tephra layer. The granulites are defined by: (1) the phase association spinel (Sp) + clinopyroxene (Cpx) + amphibole (Amp) + plagioclase (Plag) + glass + fluids, and (2) through a high-temperature deformation. In addition, we found cumulates which consist of the phases Plag + Amp + biotite (Bio) + magnetite (Mt) + orthopyroxene (Opx) ± Quartz (Qz) ± Cpx.

Presently, three types of enclaves are known at Arenal: (1) anorthosite-gabbro cumulates in the stratigraphic units ET-4, ET-3 and ET-2; (2) within ET-3, hornblende-bearing andesitic xenoliths, and in particular, spinel granulites, and (3) gabbroic cognate enclaves and xenoliths in all Arenal lavas and tephra.

According to the granulite nomenclature of Behr *et al.* (1971) we denote the granulites as spinel pyroclastics. The phases were analysed by electron microprobe.

Analysis of non volatile elements were performed with a CAMECA SX-50 at Geomar (Kiel) at 10 to 15 keV acceleration voltage, 15 nA beam current. Irradiation times for the main elements were 20 s, for trace elements, except of the volatiles Na, F, Cl and S, 60 s. Volatiles were measured with 8 nA and 15 keV using a large beam diameter in the scanning mode, applying an anticontamination system (sample chamber cooling by liquid-nitrogen and injection of oxygen into the sample chamber). The volatiles were quantified using standards of natural glass and scapolite. The quantification was performed using conventional PAP procedure (Pouchou and Pichoir, 1984). Standard deviations are below 10% at concentrations > 500 µg/g. The results are shown in table 1.

The pyroclastic paragenesis is clinopyroxene (En₄₃ Fs₁₂ Wo₅) + anorthite (An₉₅) + pargasitic amphibole (in the following abbreviated as pargasite) + dark green and blackish spinel (hercynite - magnetite - spinel solid solution) + rhyolitic glass (CIPW: qz20, af39, an24, di2, en4). The occurrence of nearly pure anorthite points to either a residual migmatitic phase assemblage or a metacumulate. The phases are slightly zoned. Phase compositions are shown in table 1 (the compositions at the rims and in the grain centers are listed). The metamorphic character of the spinel pyroclastics is defined by high-temperature deformation features, and an associated gneissous bilateral symmetric

layering defined by layers of plagioclase and clinopyroxene plus pargasite. The deformation is a porphyroclastic recrystallization of clinopyroxene, amphibole and plagioclase, at high volume amounts of neoblasts (according to the textural classifications of Nicolas, 1986). The spinel pyriclasite clearly shows evidence of a coexisting partial melt. Clinopyroxene, pargasite and spinel form miaroles into which the phases have grown idiomorphically. The crystals are of similar composition and of

similar average size (up to several 100 μm) as the crystals which are not in contact with the melt. In addition, silicate melt inclusions in clinopyroxene, pargasite and plagioclase are frequent. From this, we conclude that the partial melts have been formed at source depths of the xenoliths and before eruption of the Arenal xenolith host magmas. The occurrence of spinel points to a phase equilibrium pressure corresponding above 500 MPa.

DISCUSSION

The occurrence of granulite-facies meta-igneous xenoliths in Arenal volcanic deposits show that beneath Arenal, a mafic lower crust exists. From the high recrystallization rates of clinopyroxene, amphibole and plagioclase, we conclude that the granulites underwent a plastic high-temperature deformation at high strain rates. Because the spinel pyriclasites contain partial melt, seismic-velocities are expected to be low. The seismic P-wave velocity can be estimated to be below 6.5 km s^{-1} . Figure 2 synthesizes a crustal model beneath Arenal volcano based on Matumoto *et al.* (1977) and modified in accordance with the data discussed here. However, no prediction is possible on how much volume of lower crust has been partially molten.

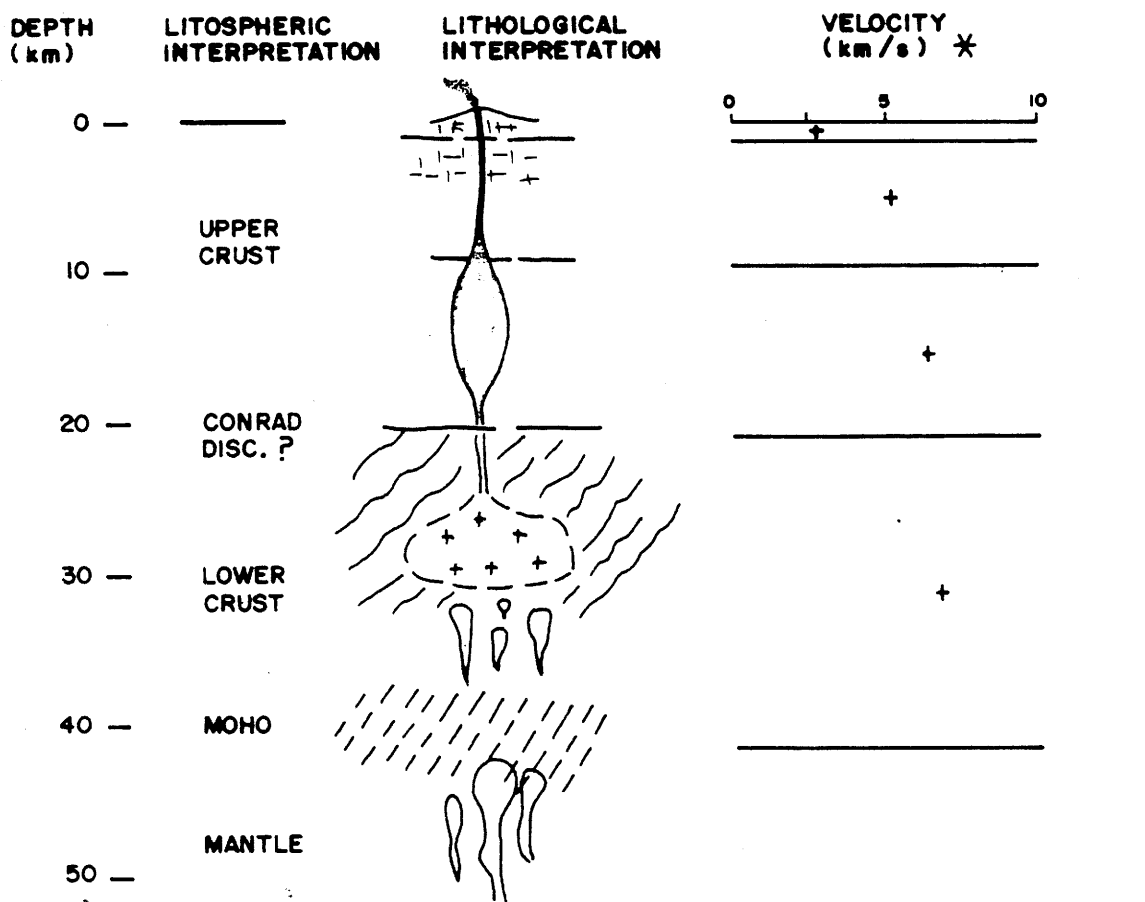
Although complicated by plagioclase fractionation or by low degree of melting of

the source, the high Sr (> 740 ppm) and Ba (> 640 ppm) contents of some mafic and intermediate rocks at Arenal volcano could be due to assimilation of metagabbroic or mafic granulitic components which are rich in these elements (*cf.* Arculus & Johnson, 1981). This process has been found to be effective also at Poás volcano (Cigolini *et al.*, 1991) and Irazú (Alvarado, 1993), where lavas and tephras have olivine-bearing xenoliths that display evidence of subsolidus instability of olivine and plagioclase, and/or coronas composed by pyroxenes and Fe-Ti oxides being extensively developed wherever these two phases are in contact.

Nevertheless, more studies are still necessary to support these preliminary conclusions. The final goal is to get a more accurate model of the crustal lithosphere in a highly active subduction zone.

ACKNOWLEDGEMENTS

To J.F. Arias, R. Fernández, and G.J. Soto (Oficina de Sismología y Vulcanología, ICE), who assisted during fieldtrip sample collection. G.J. Soto typed and edited this paper. This is a contribution to Project IGCP-345 *Andean lithospheric evolution*.



SIMBOLS

- | | | | |
|--|--|--|-------------------------|
| | VOLCANO - SEDIMENTARY COMPLEX. | | MOHO. |
| | START ANDESITIC CRISTALIZATION.
(plag + px + mt ± ol ± hb). | | MAGMATIC DIAPIRS. |
| | COGNATE GABBROS. | | MATUMOTO et al. (1977). |
| | MAFIC GRANULITES. | | |

Fig. 2 : Crustal interpretation beneath Arenal volcano, Costa Rica.

TABLE 1: Compositions of pyriclasite xenolith phases (wt. %), Arenal, ET-3 tephra layer. Cpx pc: clinopyroxene porphyroclast center; Cpx nr: clinopyroxene neoblast rim; Plg pr: plagioclase porphyroclast rim; Parg: pargasite; glass: interstitial clear glass of light brownish colour under the microscope, associated with Cpx and Plg; Sp (2.4): xenomorphic spinel in contact with Cpx and Plg; the spinels exhibit under the microscope a dark green blackish colour (magnetite-hercynite-spinel solid solution); Sp (2.5): idiomorphic grain in contact with Plg; n.d.: no determination.

PHASE (N°)	Cpx pc (1.1)	Cpx nr (1.2)	Plg pc (1.3)	Plg pr (2.1)	Parg pc (2.2)	Pargpr (2.3)	Sp (2.4)	Sp (2.5)	Glass (2.8)
SiO ₂	50.660	49.315	44.344	44.281	42.967	43.216	0.010	0.000	60.879
TiO ₂	0.184	0.459	0.000	0.000	0.592	0.633	4.953	4.878	0.752
P ₂ O ₅	0.169	0.087	0.095	0.085	0.075	0.059	0.121	0.141	0.211
Al ₂ O ₃	4.728	6.163	35.356	35.412	13.818	14.023	6.841	5.575	16.538
FeO	7.485	7.545	0.316	0.425	10.165	9.690	77.217	78.234	6.569
MgO	14.927	14.323	0.000	0.000	15.475	16.054	3.260	2.808	2.150
MnO	0.216	0.205	0.000	0.005	0.152	0.068	0.378	0.290	0.153
CuO	0.000	0.026	0.000	0.000	0.000	0.116	0.177	0.323	0.000
CaO	21.369	20.735	18.969	19.058	10.947	11.099	0.138	0.086	5.968
BaO	0.074	0.187	0.000	0.098	0.013	0.010	0.271	0.268	0.074
Na ₂ O	0.277	0.310	0.541	0.467	2.364	2.387	0.026	0.041	3.980
K ₂ O	0.000	0.000	0.052	0.011	0.103	0.111	0.067	0.078	1.202
F	0.000	0.027	0.038	0.000	0.198	0.138	0.433	0.447	0.166
Cl	n.d.	n.d.	0.005	n.d.	0.031	0.029	n.d.	n.d.	0.145
SO ₂	0.006	0.017	0.006	0.000	0.057	0.017	0.061	0.071	0.053
Total	100.09	99.397	99.722	99.842	96.957	97.650	94.003	93.302	98.840
<u>(Fe+Mn)100</u> Fe+Mn+Mg	22.45	23.29	100.00	100.00	27.23	25.43	93.03	94.01	

TABLE 1 (continuation): Normative minerals (Ab: albite; An: anorthite; Cs: celsian, Ba feldspar; Di: diopside; En: enstatite; Fs: ferrosilite; Mt: Magnetite; Or: potassium feldspar; Qz: quartz).

	Cpx pc (1.1)	Cpx nr (1.2)	Plg pc (1.3)	Plg pr (2.1)	Glass (2.8), CIPW Norm (Fe ²⁺ /Fe ³⁺ =0.75)
En	43.29	42.81	-	-	Qz 19.62
Fs	12.18	12.65	-	-	Or 7.10
Wo	44.54	44.54	-	-	Ab 32.44
An	-	-	94.80	95.54	An 24.37
Ab	-	-	4.89	4.24	Di 2.26
Or	-	-	0.31	0.07	En 4.31
Cs	-	-	0.00	0.16	Mt 19.49
					Hematite 4.14
					Ilmenite 1.43
					Apatite 0.50
					Fluorite 0.30
					Halite 0.24
					Thenardite 0.04

REFERENCES

Alvarado, G.E., 1993: Volcanology and Petrology of Irazú Volcano, Costa Rica. Ph.D. thesis, Univ. Kiel, xxv+261 pp.

Arculus, R.J. & Johnson, R.W., 1981: Island-arc magma sources: A geochemical assesment of the roles of slab-derived components and crustal contamination. *Geochem. J.*, 15:109-133.

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.

Behr, H.J., DenTek, E., DeWaard, D., Mehnert, K.H., Scharbert, K.G., Sobolev, V.S., Warznanev, A., Winkler, H.G.F., Wynne-Edwards, H.R., Zoubeck, V., Zwart, H.J., 1971: Granulites -Results of a discussion. *N. Jb. Mineral. Mh.*, 1971:97-123.

Carr, M.J., 1984: Symmetrical and segmented variation of physical and geochemical characteristics of the Central America volcanic front. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 20:231-252.

Case, J.E., 1980: Crustal setting of mafic and ultramafic rocks and associated ore deposits of the Caribbean region. U.S. Geol. Survey, Open-file Rep., 80-304:95 pp..

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., Kudo, A.M., Brookins, D.G., & Ward, D., 1991: The petrology of Poás Volcano lavas: basalt-andesite relationship and their petrogenesis within the magmatic arc of Costa Rica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 48:367-384.

Dengo, G., 1968: Estructura geológica, historia tectónica y morfología de América Central. ICAITI, Guatemala, 52 pp..

Krawinkel, J. & Seyfried, H., 1994: A review of plate-tectonic processes involved in the formation of the southwestern edge of the Caribbean Plate. *Profil*, 7:47-61, Stuttgart.

Kusssmaul, S., Paniagua, S. & Gaínza, J., 1982: Recopilación, clasificación e interpretación petroquímica de las rocas ígneas de Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional, Inf. Semestral julio-diciembre, 28:17-79.

Matumoto, T., Ohtake, M., Latham, G. & Umaña, J., 1977: Crustal structure in Southern Central America. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 67:121-135.

Montero, W., Paniagua, S., Kusssmaul, S. & Rivier, F., 1992: Geodinámica interna de Costa Rica. *Rev. Geol. Amér. Central*, 14:1-12.

Nicolas, A., 1986: Structure and petrology of peridotites: clues to their geodynamic environment. *Rev. Geophysics*, 24(4):875-895.

Pouchou, J.L. and Pichoir, F., 1984: A new model for quantitative X-ray microanalysis, Part I. Application to the analysis of homogeneous samples. *Recherche Aerospatiale*, 3:13-38.

Tournon, J., 1984: Magmatismes du Mésozoïque à l'actuel en Amérique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andésites. Ph.D. thesis, *Mém. Sc. Terre, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris*, xii+335 pp..

Tournon, J., Triboulet, C. & Azema, J., 1989: Amphibolites from Panama: anticlockwise P-T paths from a Pre-upper Cretaceous metamorphic basement in Isthmian Central America. *J. metamorphic Geol.*, 7:539-546.

Weyl, R., 1969: El desarrollo paleogeográfico de Centroamérica. Instituto Geográfico Nacional, Inf. Semestral julio-diciembre, 15-26, Costa Rica.