

# VOLCÁN YUCAMANE (SUR DEL PERÚ): GEOLOGÍA, PETROLOGÍA Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LAS AMENAZAS VOLCÁNICAS

Marco RIVERA<sup>1</sup> & Jersy MARINO<sup>2</sup>

*Dirección de Geología Ambiental - INGEMMET - Av. Canadá 1470, San Borja, Lima-Perú*

*<sup>1</sup> mrivera@ingemmet.gob.pe; <sup>2</sup> jmarino@ingemmet.gob.pe*

## RESUMEN

El estratovolcán Yucamane es el más reciente de un conjunto de volcanes extintos y erosionados que conforman el complejo volcánico Yucamane Chico-Calientes-Yucamane. Este volcán forma parte de los siete volcanes activos emplazados durante el Plio-Cuaternario en el sur peruano.

La estratigrafía del volcán Yucamane evidencia variados eventos volcánicos, divididos en dos períodos: Yucamane I y Yucamane II. Este último periodo es dividido en dos fases: «Cono de la Cumbre (IIa)» y «Caldera Reciente (IIb)». El Yucamane I, constituye el periodo eruptivo inicial que fue principalmente de carácter efusivo en el cual se emplazaron flujos de lavas andesíticas hace aproximadamente  $0.38 \pm 0.3$  Ma. A.P. Estas lavas descansan sobre un depósito de flujo de pómez y cenizas datado en  $0.54 \pm 0.18$  Ma. A.P. En una fase evolutiva intermedia se produjo el crecimiento y colapso de domos de lava que depositaron un depósito de flujo de bloques y cenizas de 12 m de espesor, a 9 km en el flanco sur del volcán (Quebrada Honda). En un segundo periodo, los domos fueron erosionados y cubiertos por flujos de lavas dacíticas y andesíticas que forman del cono superior del volcán, denominado fase «Cono de la Cumbre». Posteriormente en una segunda fase denominada como «Caldera Reciente (IIb)» que va desde el Pleistoceno superior al reciente, se produjo el emplazamiento de variados depósitos de flujos piroclásticos y caídas de cenizas y lapilli pómez  $<1\text{km}^3$  que yacen principalmente en el flanco Sur y SE del estratocono, ligados principalmente a erupciones subplinianas, freatomagmáticas y vulcanianas, y que dieron lugar a la formación de la caldera y cráter actual. Un depósito de caída de lapilli pómez de origen freatomagmático  $<1\text{ km}^3$  dispersada hacia el SE fue depositada hace aproximadamente 3,270 años A.P.

Los magmas emitidos por el volcán Yucamane son calco-alcalinos altamente potásicos, de composición andesíticas basálticas, andesíticas y dacíticas ( $\text{SiO}_2 = 54.3-64.44\%$ ). Los procesos magmáticos que intervinieron en la evolución de la serie incluyen principalmente cristalización fraccionada y a veces mezcla de magmas producidos en una cámara magmática superficial.

Los elementos trazas muestran bajos tenores en HREE e Y, y un gran fraccionamiento entre las LREE/HREE. Esta característica sugiere una asimilación y contaminación de magmas provenientes del manto en la base o parte inferior de corteza continental cuyo espesor alcanza ~70 km.

Los estudios estratigráficos y cartografiado geológico ayudaron a identificar las principales amenazas volcánicas durante una reactivación del volcán Yucamane. Estas son: caídas de téfras, flujos piroclásticos, flujos de barro, y avalancha de escombros que afectarían poblados de la provincia de Candarave donde habitan cerca de 9600 pobladores. También podrían ser afectados durante erupciones volcánicas futuras, los terrenos de cultivos, variadas obras de riego y viales, e importantes lagunas que son patrimonios hídricos de la zona, los cuales se localizan en los alrededores del volcán Yucamane. Se presentan dos mapas preliminares de amenazas volcánicas que muestran áreas que podrían ser afectadas en caso de erupciones volcánicas futuras.

## ABSTRACT

Yucamane stratovolcano is the most recent volcano in a group of extinct and eroded volcanoes that forms the Yucamane Chico-Calientes-Yucamane volcanic complex and it is also part of the seven active volcanoes emplaced in the south part of Peru during the Plio-Quaternary.

The Yucamane volcano stratigraphy shows diverse volcanic events divided into two periods: Yucamane I and Yucamane II. The latter is divided into two phases: 'Cono de la Cumbre (IIa)' and 'Caldera Reciente (IIb)'. Yucamane I constitutes an initial eruptive period that was mainly effusive in character and in which andesite lava flows were

emplaced about 0.38 Ma. These lavas rest on an ash and pumice flow deposit with an age of 0.54 Ma. The growth and collapse of lava domes which created a block and ash flow deposit of 12 m thick were produced in an intermediate evolutionary phase at a distance of 9 km in the south flank of the volcano (Quebrada Honda). In a second period, domes were eroded and covered by dacite and andesite lava flows forming the upper cone of the volcano called 'Cono de la Cumbre' phase. Later, the emplacement of several pyroclastic flow deposits and ash and pumice lapillus falls <math><1 \text{ km}^3</math> which lie mainly in the south and southeast flank of the stratocone and are mainly related to subplinian, phreatomagmatic and vulcanian eruptions and also gave rise to the formation of the current crater and caldera was produced in a second phase called 'Caldera Reciente' (IIB) that extends from the Upper Pleistocene to the recent one. A pumice lapillus fall deposit of phreatomagmatic origin <math><1 \text{ km}^3</math> spread out toward the southeast was deposited about 3270 yr B.P.

Magmas emitted by Yucamane volcano are highly potassic calc-alkalic with a basaltic andesitic, andesitic and dacitic ( $\text{SiO}_2 = 54.3 - 64.44\%$ ) composition. The magmatic processes that were part in the evolution of the series mainly include: fractional crystallization and sometimes a mixture of magmas produced in a superficial magma chamber.

Trace elements show low finenesses in HREE and Y and a large fractionation between LREE/HREE. This characteristic suggests assimilation and contamination of magmas coming from the mantle in the base or lower side of continental crust which thickness is ~ 70 km.

Stratigraphic studies and geologic cartography were useful to calculate main volcanic hazard during a reactivation of the Yucamane volcano. These are the following: tephra falls, pyroclastic flows, lahars and debris avalanche which may affect inhabited places in the province of Candarave, an area where almost 9600 inhabitants live. Likewise, cultivation grounds, several road and irrigation works as well as important lakes considered as hydric patrimonies of the area which are located around the Yucamane volcano may be affected by future volcanic eruptions. Two preliminary maps of volcanic hazards showing areas that may be affected in case of future volcanic eruptions are shown.

## INTRODUCCIÓN

El volcán Yucamane (17° 11' S; 70° 12' O, 5550 msnm.) se encuentra localizado a 11 km al NE del pueblo de Candarave (Departamento de Tacna), Figs.1 y 2. Es el más reciente de una cadena de volcanes extintos y

erosionados del complejo volcánico Yucamane Chico-Calientes-Yucamane que tiene una orientación NNO-SSE (Fig.2 y 3). Forma parte de uno de los siete volcanes activos del sur peruano, y pertenece a la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes.



Fig. 1: Complejo volcánico Yucamane localizado a 11 km al NE de la ciudad de Candarave

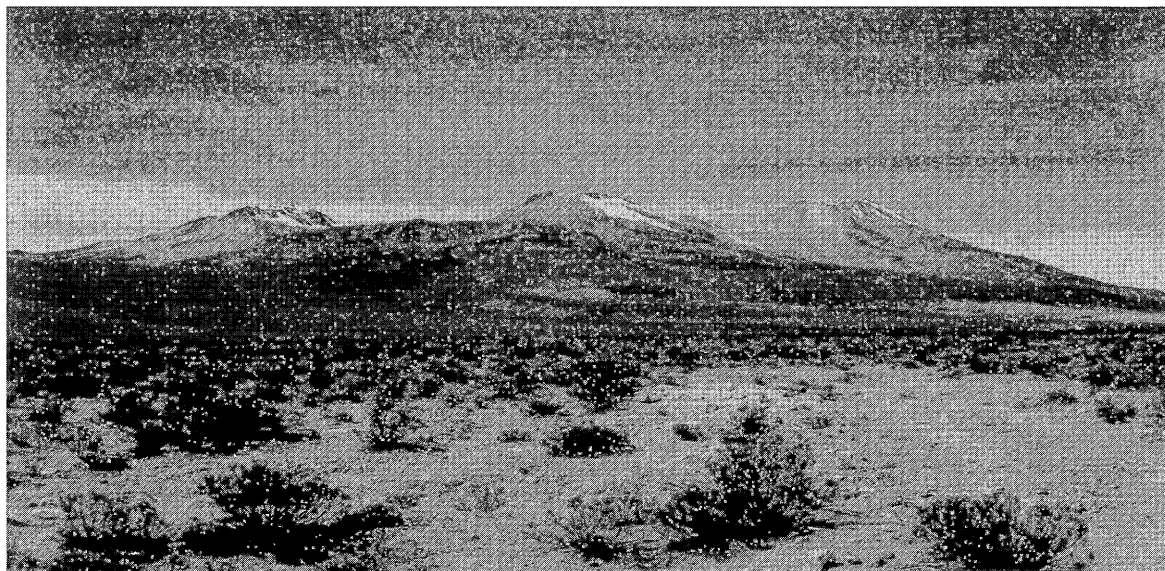


Fig. 3: Flanco oeste del Complejo Volcánico Yucamane. En el extremo izquierdo se distingue al estratovolcán Yucamane Chico, en la parte central el volcán Calientes y a la derecha el volcán Yucamane.

El estudio estratigráfico efectuado, la morfología actual y la distribución de los depósitos del Complejo Volcánico Yucamane, sugieren que la actividad volcánica tuvo una migración de norte a sur, en el cual el volcán Yucamane Chico es el más antiguo, y el Yucamane es el más reciente (Fig. 3).

Los estudios de amenaza volcánica efectuados en los últimos 10 años en el sur del Perú muestran que desde el año de 1550 al menos siete volcanes han erupcionado (Simkim and Siebert, 1994) causando daños en poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura localizados en sus inmediaciones (Rivera et al., 1998; Thouret, et al., 1999). En el año de 1600 D.C. el mayor desastre fue ocasionado por la erupción paroxismal del volcán Huaynaputina, la cual causó la muerte de más de 1,500 personas e ingentes pérdidas económicas en el sur peruano (Thouret, et al., 2002). En la actualidad algunos volcanes presentan una leve y esporádica actividad fumarólica, caso de los volcanes Sabañcaya, Ubina, y ocasionalmente el Misti, Tutupaca y Yucamane; señales que muestran que la actividad volcánica en el sur peruano aún sigue latente, por la cual se deberían tomar medidas para prevenir y mitigar sus efectos.

El objetivo del presente estudio es analizar la génesis de magmas, el comportamiento eruptivo presentado por el volcán Yucamane durante su historia eruptiva, así como la amenaza y riesgo que implicaría su reactivación con fines de prevención y mitigación de desastres.

## CONTEXTO GEOLÓGICO Y VULCANOLÓGICO

El complejo volcánico Yucamane presenta tres conos poligenéticos: Yucamane Chico al norte, Calientes al centro; y Yucamane al sur (Fig. 3). Este último es materia del presente estudio.

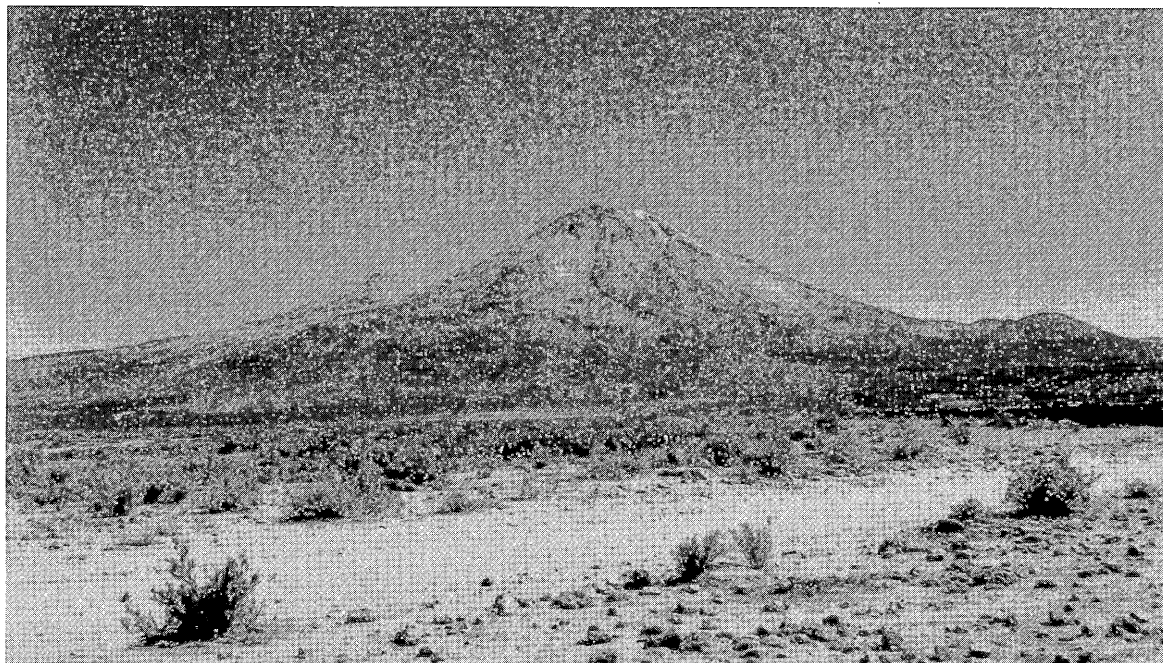
El cono poligenético Yucamane tiene forma cónica (Fig. 4). Según La Torre (1965); Morche & De la Cruz (1994), se ha edificado sobre una altiplanicie volcánica conformada por ignimbritas soldadas y lavas del Eoceno-Mioceno (Grupo Tacaza), e ignimbritas cohesivas del Pleistoceno (Grupo Barroso). El cono tiene ~1550 m de altura, y cubre un área de ~40 km<sup>2</sup>. Según su morfología, se distinguen dos aparatos volcánicos: «Yucamane I», que muestra pendientes suaves (< 20°) situado en la parte inferior del edificio, y el Yucamane II que yace encima y que presenta pendientes pronunciadas (3 40°).

Sobre los 5400 msnm, se observa una caldera semicircular que tiene un diámetro aproximado de 800 m, la cual alberga en su sector occidental un cráter semicircular de aproximadamente 0.4 km de diámetro y 200 m de profundidad, cuyas paredes están constituidas de lavas fracturadas y parcialmente hidrotermalizadas (Fig. 5). En el piso del cráter se distinguen abundantes bloques de rocas provenientes de los desprendimientos de sus paredes. El cráter actual es probablemente el resultado de variados episodios explosivos sucedidos en el Pleistoceno superior-Holoceno.

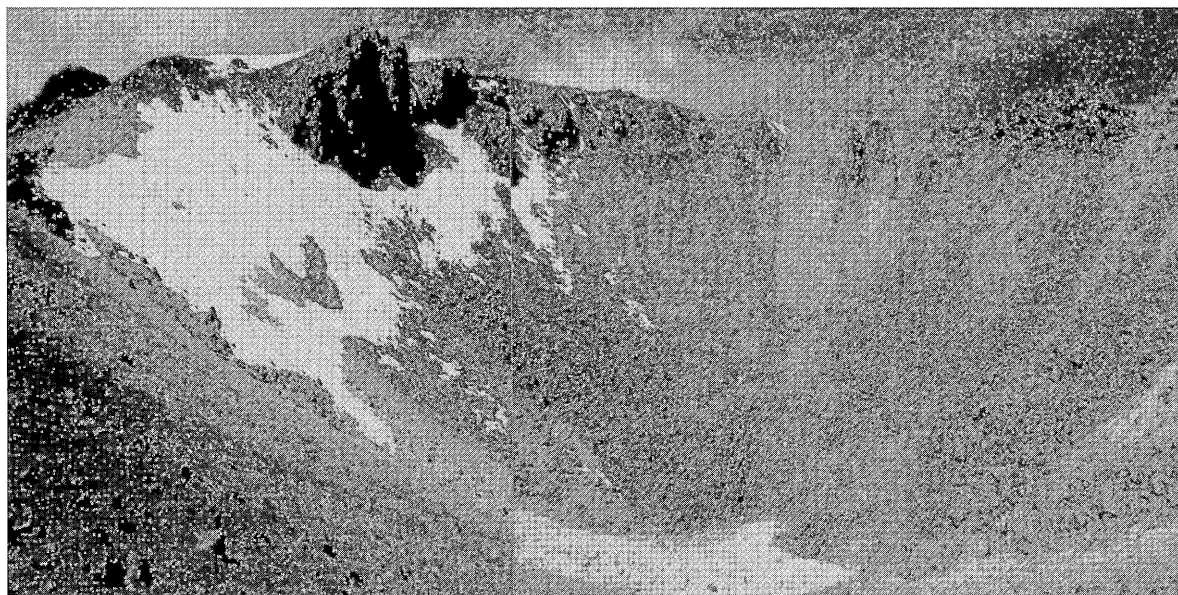
Los reportes históricos de la actividad eruptiva del Yucamane dan cuenta de un evento ocurrido en el año 1787 (Zamácola y Jáuregui, 1804). Este evento estuvo posiblemente caracterizado por la emisión de poco volumen de ceniza que fue fácilmente removido por el viento, ya que en el campo no han sido identificados los depósitos ligados a dicha erupción. La actividad actual del volcán se manifiesta por las fumarolas muy ténues existentes en el cráter, principalmente en época de lluvia.

## ESTRATIGRAFÍA Y EVOLUCIÓN

El estudio estratigráfico en ejecución, la morfología actual, así como los análisis de imágenes de satélite



*Fig. 4: Flanco sur del estratovolcán Yucamane. En primer plano la planicie conformada por depósitos piroclásticos reabajados. Al fondo se distingue al volcán Yucamane que según su morfología presenta dos estratoconos: uno inferior, que muestra flujos de lava en bloques de suave a moderada pendiente (Yucamane I). Otro superior que muestra flujos de lava y material piroclástico, con fuerte pendiente (Yucamane II)*



*Fig. 5: Cráter reciente alojado en el extremo Oeste de la caldera del volcán Yucamane. El cráter posee 400 m de diámetro, CRA-2 200 m de profundidad y su base está localizado a 5280 msnm*

Landsat TM y fotografías aéreas muestran que el Yucamane se ha construido en dos períodos: «Yucamane I» y «Yucamane II» (Fig. 6). El último período está compuesto de dos etapas: «Cono de la Cumbre» y «Caldera Reciente».

#### **Yucamane I (Pleistoceno Medio)**

Período eruptivo esencialmente efusivo, durante

el cual se emplazaron coladas de lava en bloques de composición andesítica que cubren una superficie aproximada de 40 km<sup>2</sup> y constituyen el edificio superior (Figs. 2 y 6). El emplazamiento de estas lavas fue anterior y coetánea con las lavas del volcán Calientes (Fidel & Huamani, 2001). Cada colada tiene entre 20 y 50 m de espesor y el conjunto alcanza aproximadamente 600 m. Datación efectuada de un flujo de lava que yace al pie del flanco sur por De la Cruz & De la Cruz, (2000) dio una



SERIES FORMACION	ETAPAS DE EVOLUCION VOLCANICA		ESPESOR (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION Y FACIES		
HOLOCENO	ESTRATO-CONO YUCAMANE MODERNO	CRATER DE LA CUMBRE	0.1		Caída de lapilli pómez con características freatomagmáticas datada en 3270 años A.P.		
			0.12		Lahar		
PLEISTOCENO	ESTRATO-VOLCAN YUCAMANE	CONO DE LA CUMBRE	0.38		Caídas de cenizas gruesas de color gris oscura.		
			0.1		Caídas de lapilli pómez y escorias de granulometría fina (de 1 a 5 cm) con características freatomagmáticas.		
			3.0		Depósito de flujo de bloques y cenizas de color gris claro.		
			0.40		Depósito de flujo piroclástico gris con alto contenido de líticos juveniles de color gris y pocos líticos oxidados, dentro de una matriz de cenizas.		
			5.0		Depósito de flujo de escorias de color gris oscuro, con bloques de hasta 40 cm de diámetro. Los bloques están en forma de coliflor.		
		ESTRATO-VOLCAN YUCAMANE ANTIGUO	CRECIMIENTO Y DESTRUCCION DE DOMOS	1.5		Depósito de flujo de ceniza de color ocre.	
				0.40		Lahar	
				1.5		Depósito de oleada piroclástica (ceniza blanca con estratificación cruzada).	
				0.35		Lahar	
				±0.15		Depósitos de flujo piroclástico de varios niveles: base lapilli escoria, y ceniza, en la parte media ceniza, y parte superior lapilli de color ocre. Depósito de flujo de ceniza de color gris.	
GRUPO BARROSO	ESTRATO-VOLCAN YUCAMANE ANTIGUO	CONSTRUCCION DE LA CIMA DEL ESTRATOVOLCAN	800		Flujos y coladas de lavas dacíticos y andesíticos en bloques del cono superior del volcán.		
			12.0		Depósito de flujo de bloques y cenizas de color ocre rojizo claro (con bloques de hasta 1.2 m de diámetro), datación en proceso.		
			0.1		Depósito de flujo de ceniza ocre, con poco contenido de fragmentos líticos andesíticos de hasta 3 cm. Nivel de suelo rojizo		
			0.24				
			1.8		Depósitos de flujos de bloques y cenizas, con fragmentos de líticos de hasta 20 cm de diámetro. Matriz de ceniza gruesa producto de molienda.		
		PLIOCENO	G. TACAZA	ESTRATO-VOLCAN PRE-CONO YUCAMANE, COLAPSO DE CALDERA?	±600		Flujos de lavas andesíticos de la base del volcán. Datada en 0.38±/0.3 Ma (De la Cruz & De la Cruz, 2001).
					100		Ignimbritas no soldadas de color gris claro, con un tope de color amarillento. Presencia de pómez de hasta 40 cm de diámetro. Concentración de pómez al tope. Depósito datado en 0.54±/0.17 Ma (France, L. 1985).
					200		Flujos de lavas en bloques de composición dacítica y andesítica datada en 0.97 ±/0.04 Ma (De la Cruz & De la Cruz, 2001).
					300		Ignimbritas soldadas de color ocre, con prismación vertical, que forman parte del basamento del Yucamane.

Fig. 6: Columna estratigráfica generalizada del Volcán Yucamane

edad de  $0.38 \pm 0.3$  Ma A.P. Estas coladas yacen sobre depósitos de flujos de pómez y cenizas riolíticas datadas en  $0.54 \pm 0.18$  Ma. A.P. (France, 1985) y lavas andesíticas emplazadas hace  $0.97 \pm 0.04$  Ma. A.P. (De la Cruz & De la Cruz, 2000) es decir del Pleistoceno medio a superior.

Posteriormente, se produjo el crecimiento y colapso de domos cuyos depósitos de flujos de bloques y cenizas de composición dacítica son visibles en Quebrada Honda (9 km al Sur del volcán) en donde alcanzan 12 m de espesor (Fig. 7). Dichos domos fueron erosionados y cubiertos por flujos de lavas andesíticas y dacíticas posteriores.

### **Yucamane II (Pleistoceno Superior hasta la época histórica)**

#### *a) Cono de la Cumbre*

En esta primera etapa se produjo esencialmente el emplazamiento de flujos de lavas dacíticas y andesíticas en bloques que conforman el edificio superior del volcán (Figs. 4 y 6). Este evento se dio alternadamente con el

crecimiento y colapso de domos que depositaron flujos de bloques y cenizas de composición dacítica, visibles en las quebradas del flanco sur (ej. Quebrada Honda). Los flujos de lava superpuestos presentan en general pendientes  $\geq 40^\circ$  y han recorrido una distancia máxima de 4.5 km con dirección radial al cráter.

#### *b) Caldera de la Cumbre*

Durante el Pleistoceno superior y Holoceno, la actividad eruptiva del Yucamane fue caracterizada por erupciones explosivas de baja magnitud que depositaron varias capas de caídas de tefras y flujos piroclásticos de poco volumen (Figs. 7, 8 y 9). Estas erupciones explosivas (principalmente vulcanianas, subplinianas y freatomagmáticas) formaron el cráter actual.

Desde la base hasta el tope se distinguen varios depósitos agrupados en tres tipos:

1) Cuatro depósitos de flujos de cenizas cohesivas, de colores ocre y gris de poco volumen que yacen sobre el depósito de flujos de bloques y cenizas del Yucamane II

*Fig. 7: Secuencia piroclástica a 9 km del cráter, en el flanco sur. A la base depósito de flujo de pómez y ceniza datada en  $0.54 \pm 0.18$  Ma. A.P. sobre el cual yacen productos del volcán Yucamane. En la parte superior flujo de bloques y cenizas emplazado después del emplazamiento de lavas del Yucamane I*



(Qda. Honda, Fig. 7). En la base del último depósito de flujo yace un nivel de oleada piroclástica gris clara de 20 cm de espesor (8 km al sur, Qda. Honda). En general los depósitos de flujos de cenizas son masivos y cada uno posee entre 0.15 a 1.5 m de espesor. En medio de estos depósitos se hallan intercalados depósitos de lahares de 1,2 a 2,0 m de espesor.

2) Un depósito de flujo de escorias grises de 6 m de espesor (7 km al sur del cráter) canalizado dentro de paleoquebradas localizadas al pie del flanco sur. Este depósito  $<0.6 \text{ km}^3$  se distingue hasta 9 km al sur del volcán (Quebradas Honda y Campanani). Sobre este depósito yacen un flujo de cenizas y otro de bloques y cenizas de colores gris de 0.40 y 3.0 m de espesor, respectivamente.

3) Durante los últimos miles de años se emplazaron varios depósitos de caídas piroclásticas, distinguiéndose tres depósitos delgados de cenizas y lapilli pómez que varían entre 0.10 a 0.40 m de espesor. Estos depósitos afloran 9 km al sur y al este del cráter. En general las cenizas y pómez muestran características freatomagmáticas. En este tiempo también se produjo la emisión de proyectiles balísticos, basado en la presencia de bloques y bombas de hasta 3 m de diámetro (Fig. 8) en el borde oeste del cráter reciente, ligado a uno de los eventos explosivos recientes.

4) Uno de los depósitos más recientes de caída de lapilli pómez, tiene un volumen  $<0.1 \text{ km}^3$ , y fue emplazado hace  $3270 \pm 50$  años A.P (Apendice 1), producto de una actividad freatomagmática del Yucamane. Dicho depósito está constituido de lapilli pómez de colores amarillentos que miden de 1 a 4 cm, y fragmentos líticos lávicos de

hasta 5 cm, alterados e hidrotermalizados. Este depósito masivo yace al pie del flanco este del volcán y sobre la altiplanicie volcánica, tuvo probablemente una dispersión lobular cuyo eje estaba dirigido hacia el SE hasta una distancia de 10 km desde el cráter (Fig. 9).

## PETROGRAFÍA

Un total de 34 muestras fueron recolectadas alrededor de los volcanes Yucamane, Calientes y Yucamane Chico. Estas muestras fueron analizadas y especialmente las muestras del volcán Yucamane fueron asignadas en su respectiva unidad estratigráfica.

### *Yucamane I*

El «Yucamane I» está constituido por depósitos de flujos piroclásticos andesíticos y dacíticos (Yu-05, 09), lavas andesíticas (Yu-18, 28, 22) y lavas andesíticas basálticas (Yu-19, 21).

Los flujos piroclásticos (Yu-05, 09) presentan una textura eutaxítica y vitroclástica. Están constituidos de fenocristales de plagioclasas, anfíboles, biotitas y óxidos. Las plagioclasas son de formas euédrales a subédrales, y están macladas y zonadas. Se distinguen como fenocristales que miden hasta 7 mm y microcristales menores de 50  $\mu\text{m}$  dispersos dentro de la matriz vítrea. Los fenocristales de anfíboles son de formas subédrales y miden hasta 2.7 mm. Estos presentan bordes de óxidos, y algunos están remplazados en óxidos. La biotita mide hasta 2.4 mm y se encuentra en ~5%. Algunas biotitas presentan inclusiones de plagioclasas y óxidos. Los óxidos están principalmente en la matriz, y son menores de 300  $\mu\text{m}$ . En los flujos piroclásticos de composición andesítica

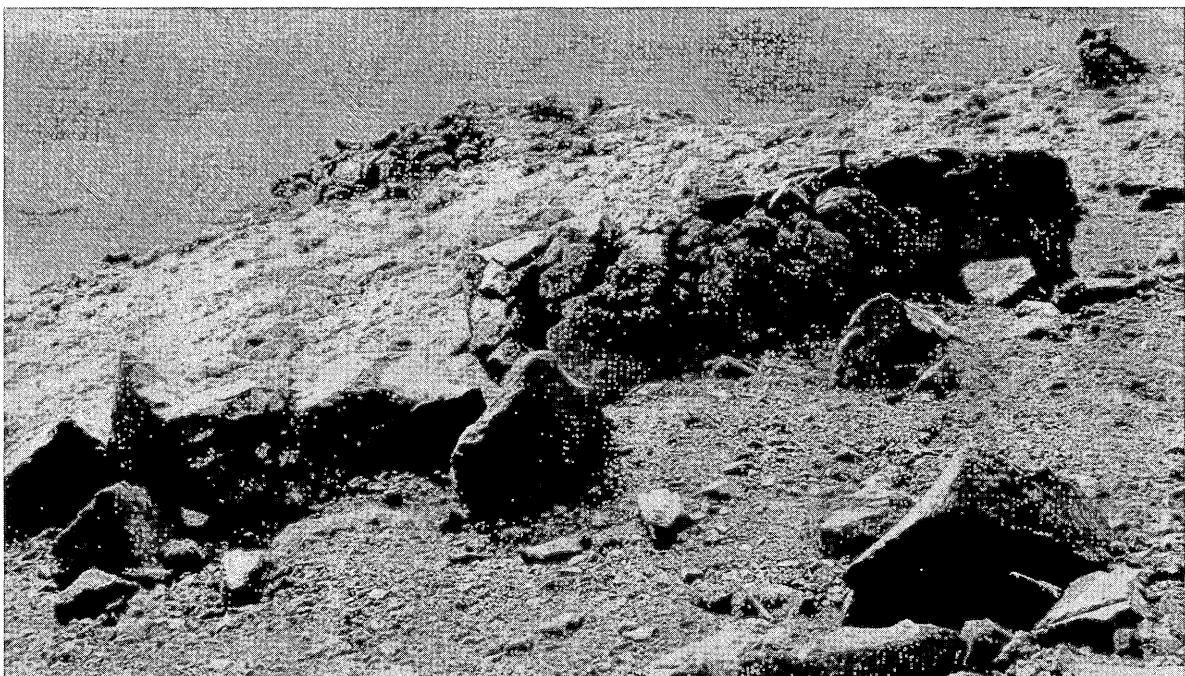


Fig. 8: Bomba con fracturamiento radial localizado en el borde de la pared oeste del cráter del volcán Yucamane.

predominan las plagioclasas y anfíboles. Mientras que en los de composición dacítica predominan las plagioclasas y biotitas.

En cuanto a las lavas son de composición andesítica y andesítica basáltica. Las lavas andesíticas presentan texturas porfiríticas, y contienen fenocristales de plagioclasas, ortopiroxeno, anfíbol, biotita y óxidos. Las plagioclasas son de formas subhedrales a euhedrales, macladas y zonadas. Se distinguen hasta tres familias de plagioclasas, los microlitos menores de 100  $\mu\text{m}$ , dispersos en la matriz, los microcristales menores de 400  $\mu\text{m}$  y los fenocristales que llegan a medir hasta 7 mm. Los anfíboles son subhedrales, frecuentemente presentan bordes de óxidos, otros se encuentran totalmente desestabilizados en óxidos. Estos pueden medir hasta 3 mm. Los ortopiroxenos presentan formas subhedrales a euhedrales y miden menos de 200  $\mu\text{m}$ . Frecuentemente se encuentran aglomerados de piroxenos, óxidos y plagioclasas. Las biotitas son de formas subhedrales, y alcanzan a medir 1.2 mm. Los óxidos están principalmente en la matriz, e incluidos en la biotita, anfíboles y piroxenos.

Las andesitas basálticas son de texturas porfiríticas

y contienen fenocristales de plagioclasas, olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno, anfíbol y óxidos. Las plagioclasas son de formas subhedrales y euhedrales. Se distinguen dos familias, los microlitos menores de 100  $\mu\text{m}$  que están en la matriz, y los fenocristales de hasta 2.7 mm. Los ortopiroxeno y clinopiroxeno son de formas subhedrales y miden hasta 600  $\mu\text{m}$ . Los anfíboles tienen forma subhedrales, con bordes de óxidos, y algunos son completamente remplazados por óxidos, llegan a medir hasta 900  $\mu\text{m}$ . El olivino de forma subhedral, mide hasta 600  $\mu\text{m}$  y se encuentra en menos del 2%. Los óxidos de Fe-Ti están principalmente en la matriz, y como inclusiones en los piroxenos, llegan a medir hasta 300  $\mu\text{m}$ . Se distinguen aglomerados de piroxenos, plagioclasas y óxidos.

### *Yucamane II*

#### a) Cono de la Cumbre (IIa)

El cono de la cumbre está conformado por flujos y coladas de lava andesíticas (Yu-14, 27, 29, 30, 32) y

*Fig. 9: Depósito de caída de lapilli pómez de origen freatomagmático localizado al pie del flanco este del volcán datado en 3, 270 años A.P.*





dacíticos (Yu-11, 12, 26, 31) de colores grises claros a oscuros. Estas son de textura porfirítica.

Las lavas andesíticas presentan fenocristales de plagioclasas que varían de 3 a 7 mm, hasta en 80%. Son de formas subhedrales a euhedrales, y algunas están zonadas. Los anfíboles son de forma subhedral y euhedral y miden hasta 4 mm, algunos presentan bordes de óxidos, y otros están completamente remplazados por óxidos. Los ortopiroxenos son de formas subhedrales a euhedrales. También se encuentra como inclusión en algunos fenocristales en biotita. Estas rocas son de composición andesítica.

Las dacitas presentan fenocristales de plagioclasas de formas euhedrales a subhedrales. Estas están macladas y zonadas. Se presenta en forma de microlitos de hasta 50 mm y fenocristales que miden hasta 4 mm. Los anfíboles son de formas subhedrales y euhedrales y miden hasta 2.8 mm, estos presentan bordes de oxidación. Los ortopiroxenos de formas subhedrales a euhedrales miden hasta 400 mm. Las biotitas son mayormente de formas subhedrales y miden hasta 4.5 mm, presentan inclusiones de óxidos y plagioclasas, en algunos casos presentan bordes corroídos.

#### b) Caldera Reciente (IIb)

La etapa «Caldera Reciente» está conformado por cuatro tipos litológicos: flujos de bloques y cenizas dacíticos (Yu-10), lapilli pómez andesítico de caída (Yu-15), flujo de pómez dacítico (Yu-16), y bombas perteneciente a un flujo de escoria andesítico (Yu-13, 20). Estas rocas presentan vesículas amorfas y subredondeadas, fueron emitidas durante la última etapa eruptiva del volcán Yucamane.

El flujo de bloques y cenizas presenta bloques juveniles con textura eutaxítica. Estos contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita, cuarzo y óxidos. La plagioclasa, de forma euhedral a subhedral, está maclada y zonada, se presenta como fenocristales de hasta 5 mm y como microcristales en la matriz menores de 300 mm. La biotita de formas euhedral a subhedral mide hasta 4 mm. Los anfíboles son de formas euhedrales a subhedrales y miden hasta 2 mm. Los óxidos se encuentran principalmente en la matriz y como inclusiones dentro de la biotita. El cuarzo es de forma subhedral y esta en aproximadamente 2%. Este flujo es de composición dacítica.

Pómez de color amarillento perteneciente a un depósito de caída de lapilli pómez emitido durante una de las últimas erupciones del Yucamane. Esta roca presenta cristales de plagioclasas, macladas y zonadas, en aproximadamente 30%. Se distinguen dos familias, los microlitos alargados dispersos en la matriz y los fenocristales que miden hasta 4 mm. Los clinopiroxeno y ortopiroxeno son de formas euhedrales a subhedrales, y alcanzan a medir hasta 600 mm. Los anfíboles son de formas subhedrales a euhedrales, con bordes oxidados, miden hasta 600 mm. La biotita es mayormente de forma

subhedral, llega a medir hasta 3,5 mm, presenta inclusiones de óxidos y plagioclasas. Los óxidos están principalmente en la matriz. Las vesículas deformes miden hasta 2 mm. Estos pómez son de composición andesítica

Los pómez son de color gris y presentan textura vitroclástica. Presentan fenocristales de plagioclasas, anfíbol, biotita, óxido. Las plagioclasas son de formas subhedrales, y están macladas y algunas zonadas. Se presenta como microlitos alargados menores de 300 mm dispersos en la matriz y los fenocristales que miden hasta 3 mm. Los anfíboles son de formas subhedrales a euhedrales y miden hasta 300 mm. La mayoría presentan bordes constituido de óxidos. La biotita mayormente es de forma subhedral, miden hasta 2,4 mm. Algunos presentan inclusiones de óxidos y plagioclasas. Los óxidos están principalmente en la matriz y miden hasta 400 mm. Estos pómez son de composición dacítica.

La muestra de bomba presenta fenocristales de plagioclasas de formas euhedrales a subhedrales. Estas están macladas y zonadas, se presenta como microlitos y fenocristales que miden hasta 6 mm. Se distinguen aglomerados de plagioclasa y óxidos. El ortopiroxeno de forma euhedral a subhedral mide hasta 1.5 mm. La biotita subhedral mide hasta 3 mm. Los anfíboles de formas subhedrales a euhedrales, de formas alargados, llegan a medir hasta 600 mm. Los óxidos principalmente están en la matriz, también como inclusiones en la biotita y piroxeno, llegan a medir hasta 600mm. Presencia de olivinos de hasta 1 mm, que interaccionan con la plagioclasa. Esta muestra de composición andesítica evidencia procesos de mezcla magmática.

Basado en el orden de aparición de los minerales se concluye que la cristalización fraccionada parece haber tenido un importante rol en la evolución de la serie magmática.

#### GEOQUIMICA

Se han efectuado 17 análisis químicos de elementos mayores y trazas de rocas lávicas y piroclásticas del complejo volcánico Yucamane (Tabla 1). Estos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Química del Servicio Geológico de Canadá. Todos los elementos trazas fueron analizados por ICPMS, mientras que los elementos mayores fueron realizados por el método de fluorescencia de rayos X.

La descripción geoquímica va ser principalmente desarrollada sobre el volcán Yucamane el cual ha presentado actividad eruptiva más reciente.

#### Clasificación de la serie

Según el diagrama TAS («Alcalis Total vs Silice») de Le Bas *et al.*, (1986), Fig. 10, la totalidad de rocas del volcán Yucamane son constituidos de andesitas basálticas, andesitas, dacitas (54.3-64.44 % SiO<sub>2</sub>), altamente potásicas (1.57-3.07 %K<sub>2</sub>O).

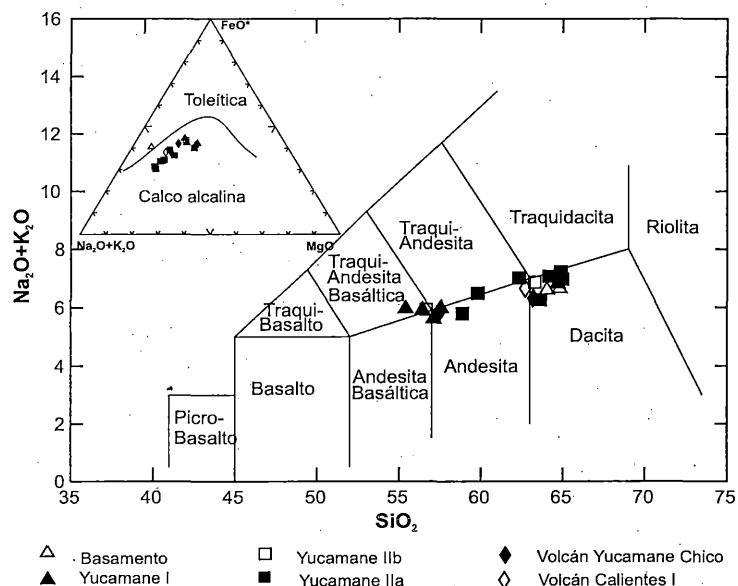
El carácter calco-alcalino de las rocas es mostrado

**TABLA 1**  
Análisis químico de elementos mayores de rocas del volcán Yucamane

CODIGO UNIDAD	YU-02	YU-08	YU-09	YU-10	YU-11	YU-12	YU-14	YU-17	YU-18	YU-19	YU-20	YU-22	YU-23	YU-24	YU-26	YU-28	YU-29	YU-31	YU-32
substrato	substrato	substrato	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib	lib
Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación	Ubicación
Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM	Coordenadas UTM
SiO2	62.1	63.25	63.25	62.85	63.85	64.44	58.12	61.25	56	54.3	56.4	56.45	56.98	62.08	62.43	57.4	59.25	62.53	61.5
TiO2	0.68	0.66	0.66	0.76	0.6	0.66	1.07	0.88	1.14	1.23	1.09	0.78	0.78	0.76	0.68	1.03	0.9	0.76	0.81
Al2O3	16.79	16.3	16.15	16.78	17.15	16.72	16.54	16.27	17.52	17.21	18.46	18.82	19.55	16.08	15.57	18.02	18.31	15.97	17.27
Fe2O3	5.5	4.67	4.79	5.16	4.27	4.32	7.08	5.74	7.72	8.07	7.7	7.37	6.61	5.72	5.48	7.48	6.1	4.92	5.29
MnO	0.05	0.07	0.08	0.08	0.05	0.06	0.1	0.07	0.1	0.11	0.1	0.09	0.09	0.09	0.08	0.11	0.1	0.06	0.06
MgO	0.89	1.82	1.9	2.03	1.61	1.82	3.8	1.91	3.98	4.15	2.99	2.68	2.39	2.15	2.44	3.14	2.1	1.85	2.09
CaO	4.41	4.17	4.11	4.65	3.72	3.97	5.93	4.8	6.54	6.7	6.56	6.92	6.64	4.94	5.12	6.3	5.58	4.26	4.49
Na2O	3.33	3.54	3.55	3.91	4.16	4.44	3.52	3.61	3.83	3.9	4.02	3.77	4.24	3.66	3.9	3.76	4.14	4.17	4.28
K2O	3.07	2.94	3.1	2.9	2.68	2.72	2.19	2.69	2.02	1.92	1.87	1.77	1.57	2.53	2.23	2.19	2.28	2.71	2.64
P2O5	0.18	0.2	0.2	0.23	0.18	0.17	0.36	0.29	0.37	0.39	0.35	0.2	0.24	0.24	0.18	0.29	0.33	0.24	0.27
LOI	2.47	1.8	1.7	0.06	1.37	0.23	0.85	0.17	0.35	0.28	0.1	0.75	0.4	0.7	0.36	-0.05	0.39	0.53	0.69
Total	99.62	99.59	99.66	99.59	99.84	99.77	99.73	98.08	99.78	98.47	99.87	99.76	99.67	99.11	98.66	99.85	99.68	98.2	99.59
Rb	86.8	95.6	109.5	99.2	70.8	74.3	62.9	72.5	47.4	39.1	34.6	46.5	32.8	75.2	67.8	64.1	60.5	77.6	62.8
Sr	541	645	633	735	688	694	831	850	1030	992	942	696	805	740	757	843	933	823	789
Ba	701	834	786	905	941	921	828	951	997	878	771	602	651	801	847	830	945	1100	977
V	90	103	116	126	100	80	190	144	211	216	182	228	168	142	160	215	136	126	123
Cr	30	20	20	20	30	30	90	20	70	60	10	20	10	20	30	20	10	20	20
Co	22.9	27.1	19.6	23.4	20.1	17.6	27.7	24	33.7	32.3	30.6	28.8	23	56.3	25.3	32.9	20.4	20.1	25.6
Ni	19	10	13	12	17	15	38	11	10	30	10	13	11	10	18	14	6	15	14
Zr	132.5	149.5	146.5	148	150.5	160	167	182	181	172	154.5	119	143	144.5	144.5	155.5	163.5	185.5	175.5
Y	12.8	11.7	12.1	13.5	9.9	9.5	15.8	11.9	15.1	14.5	14.3	15.4	14.7	12.8	12.5	17.3	15.3	11.1	9.6
Nb	9	10	10	11	8	8	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	6	6	13	8	10	10	10	10
Cs	7	5.1	5.1	4.3	1.4	2.2	2.6	3	3.7	1.2	1.6	1	0.6	3.7	2.8	1.5	2.2	3	2.4
La	25.3	30.3	34	32.7	27.2	26.5	34.5	35.7	34.6	32.1	28	18.6	21.9	29.2	25.3	31.5	32.7	32.3	29.9
Ce	43.8	53.3	53.5	61.2	46.9	45	63.4	61.2	65.1	58.1	47.5	33.1	36.9	53.3	44.7	57.7	61.3	60.4	53
Pr	5.4	6.3	7.2	6.8	5.8	5.7	8.3	8.1	8.2	7.6	6.9	4.3	5.2	6.6	5.6	7.4	7.4	7.5	6.9
Nd	19.2	22.8	26.4	25.2	22	21.1	32.5	31.1	31.7	29.3	27.6	17.2	20.9	24.2	21.1	29.3	28.4	27.9	26.6
Sm	4	4.6	4.6	5.9	4.5	4.2	6.8	6.2	6.7	6.8	6	4	4.4	5.4	4.5	6.2	6.4	5.9	5.2
Eu	1	1.1	1.1	1.4	1	1	1.5	1.6	1.7	1.5	1.5	1	1.2	1.4	1.1	1.5	1.6	1.5	1.2
Gd	3.2	3.5	3.9	3.9	3.1	3	5.2	4.9	5.3	4.7	4.3	3.1	3.5	3.8	3.3	4.7	4.8	4.3	3.4
Tb	0.4	0.4	0.5	0.6	0.4	0.4	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.5	0.4
Dy	2.6	2.3	2.3	2.8	2	1.8	3	3	3.4	3.4	3.2	2.9	2.8	2.7	2.4	3.3	3.3	2.2	2.3
Ho	0.5	0.4	0.5	0.6	0.4	0.4	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7	0.7	0.5	0.4
Er	1.7	1.3	1.2	1.5	1.1	1.1	1.7	1.3	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	1.2	1.8	1.8	1.2	1.1
Tm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
Yb	1.5	1.2	1.2	1.3	1	0.9	1.3	1	1.4	1.5	1.4	1.7	1.5	1.3	1.2	1.5	1.6	0.9	0.8
Lu	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
Ga	20	21	20	23	22	22	22	25	24	24	24	22	23	22	23	24	25	24	23
Hf	4	5	4	4	4	5	5	5	5	5	5	4	4	5	4	4	4	5	6
Ta	2	4.4	3.4	3.1	1.8	1.9	2	4	3.2	2.4	2.8	2.2	1.2	11.2	3	3.9	2.2	2.5	4.4
Th	9	14	15	13	9	9	8	10	5	4	4	4	3	11	7	7	7	9	7

Yucamane Antiguo= Yucamane I Yucamane Moderno= Yucamane II Cono de la cumbre= Ila Cráter de la cumbre= Ilib

Fig. 10:  
Clasificación de lavas y rocas piroclásticas del volcán Yucamane en los diagramas: a) TAS de Le Bas et al., (1986), insertado Diagrama AFM de Irvine and Baragar (1971).



en el diagrama triangular AFM de Irvine and Baragar (1971); Fig. 10, donde se observa una línea de enriquecimiento en álcalis, clásico de la serie calco-alcalina. Estas características geoquímicas son similares a los demás estratovolcanes Plio-Cuaternarios de la Zona Volcánica Central de los Andes (CVZ); como los estratovolcanes Misti (Legendre, 1999), Huaynaputina (Eissen et al., 1996), Ubinas (Rivera, 2000) y Sabancaya (Gerbe and Thouret, 2004).

### Evolución de los elementos mayores

Los análisis de los elementos mayores han sido recalculados en base anhidra y al 100%, mientras que el hierro es expresado en forma de hierro total ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Se ha efectuado algunos diagramas de Harker donde se distinguen que la evolución es marcada por una disminución de  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y un aumento de  $\text{K}_2\text{O}$  con el aumento en  $\text{SiO}_2$  (Fig. 11). La tendencia general de los principales óxidos en las andesitas básicas hasta las dacitas es compatible con un proceso de cristalización fraccionada.

La disminución de los porcentajes en  $\text{MgO}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con el aumento en  $\text{SiO}_2$  puede estar ligada al fraccionamiento temprano del olivino y piroxeno, seguido del anfíbol y la biotita. Mientras que una relación decreciente de  $\text{CaO}$  en función de  $\text{SiO}_2$  puede corresponder a la cristalización temprana de los clinopiroxenos y plagioclasas, seguido del anfíbol en los términos medianamente evolucionados de la serie. Los porcentajes de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  disminuyen en toda la serie indicando el fraccionamiento de la magnetita, ilmenita y en menor medida de la biotita.

Se resalta que existe una ligera evolución de los porcentajes en elementos mayores en función de la  $\text{SiO}_2$

durante la evolución del volcán Yucamane, siendo los productos del periodo «Yucamane I» más básicos, mientras que los productos más recientes (Yucamane IIa) son poco más diferenciados. No se distinguen productos evolucionados (riolitas) en ninguna etapa eruptiva, que muestren un carácter altamente explosivo de este volcán.

### Elementos trazas

Según su comportamiento durante la diferenciación se distinguen en: *elementos incompatibles* caso del Rb, Th, La y Nb que presentan correlaciones positivas con respecto a los porcentajes en  $\text{SiO}_2$ . Mientras que los *elementos compatibles* caso del Sr, Sm, Ni, V, Cr, Co, Eu, Nd, Yb e Y son fuertemente incorporados en los minerales que fraccionan. Por ende, ellos presentan correlaciones negativas a medida que aumentan los porcentajes en  $\text{SiO}_2$ .

El rubidio (Rb) tiene un comportamiento fuertemente incompatible durante la diferenciación y una gran gama de variación; este elemento es escogido como índice de diferenciación para discutir la evolución de los porcentajes de los elementos incompatibles (Fig. 12).

El níquel (Ni) y cromo (Cr) presentan correlaciones negativas con respecto al Rb. La disminución del porcentaje de Ni es más marcado en los términos pocos diferenciados de la serie. Esta disminución señala el elevado fraccionamiento del clinopiroxeno y ortopiroxeno en una etapa intermedia de la evolución del magma. En cambio, el vanadio (V) traduce el rol preponderante del fraccionamiento de los óxidos de ferro-titaníferos durante la evolución de los magmas del Yucamane.

El estroncio (Sr) muestra un carácter compatible durante la diferenciación. Su carácter compatible durante la diferenciación puede ser atribuido al fraccionamiento de la plagioclasa.

Fig. 11: El Diagrama de Harker muestra que la evolución de la serie controlado principalmente por cristalización fraccionada. Además el diagrama  $K_2O/SiO_2$  de Gill (1981) que muestra que las rocas del volcán Yucamane son altamente potásicas.

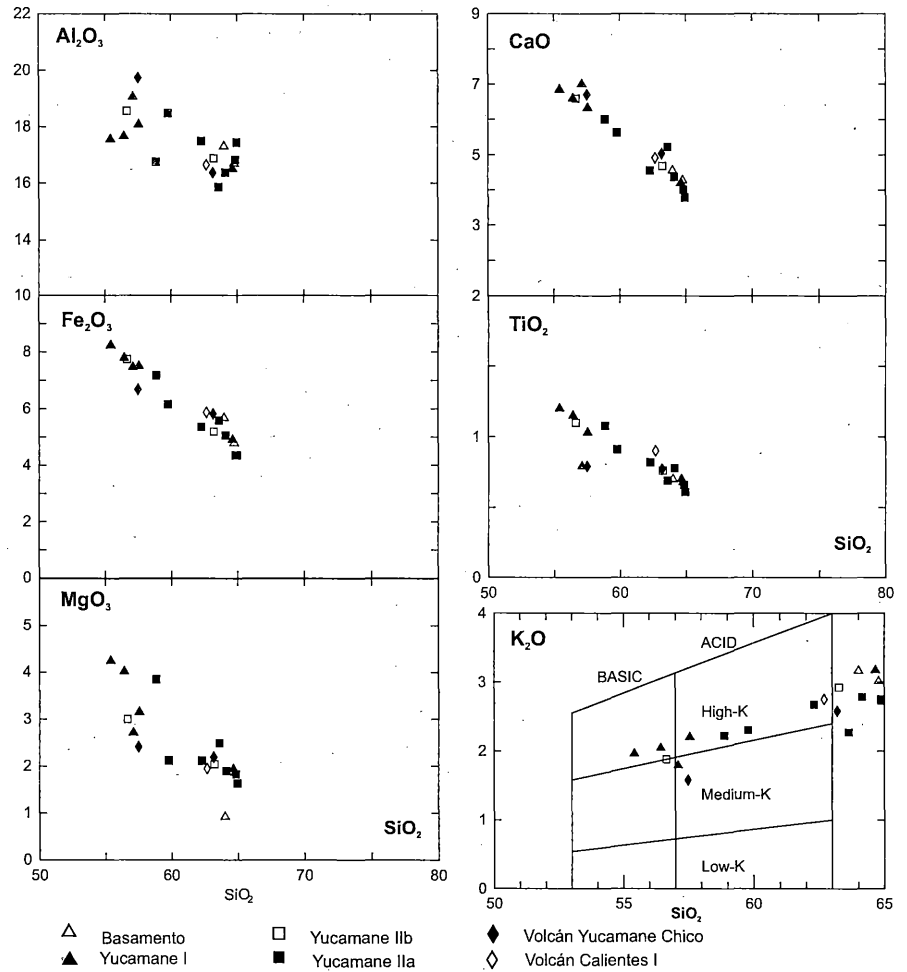
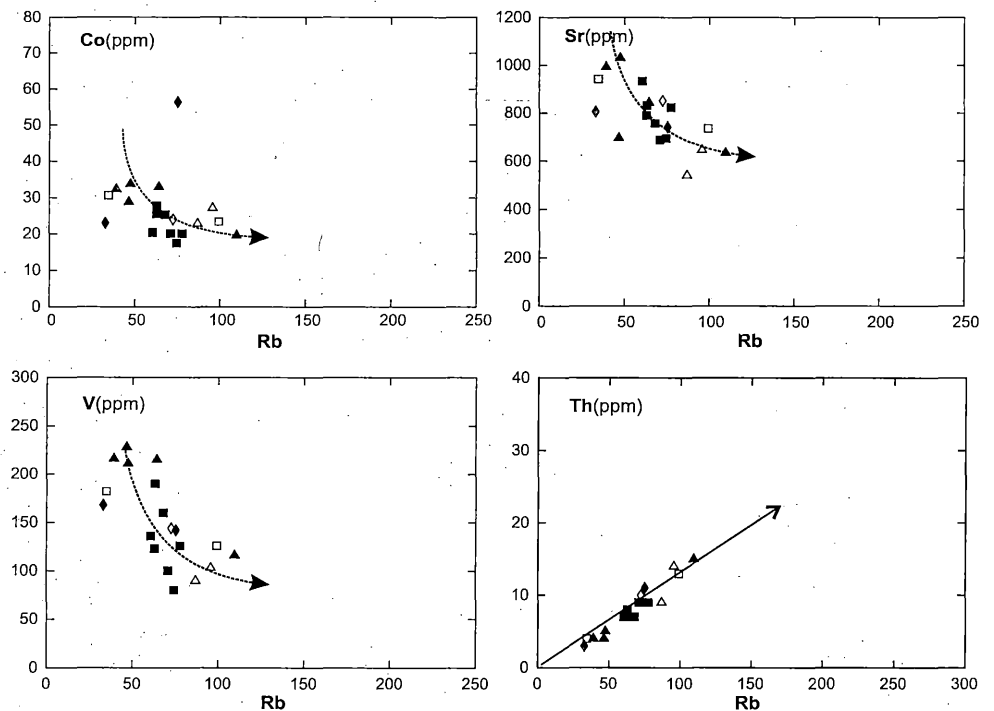


Fig. 12: Diagrama de porcentajes en elementos trazas en función de Rb. Además diagrama Th en función de Rb.





**Las Tierras Raras (REE)**

Los espectros de tierras raras del volcán Yucamane han sido normalizados con relación a las Condritas (Fig. 13). Estos espectros pertenecen a las rocas menos diferenciadas de cada periodo eruptivo del volcán Yucamane y los volcanes Yucamane Chico y Calientes (andesitas y andesitas basálticas). Los espectros de las lavas y depósitos piroclásticos son subparalelas (Fig. 13). El enriquecimiento con relación a las condritas aumenta a medida que aumenta la diferenciación. El subparalelismo de los espectros confirma la importancia del proceso de cristalización fraccionada en la evolución de los líquidos.

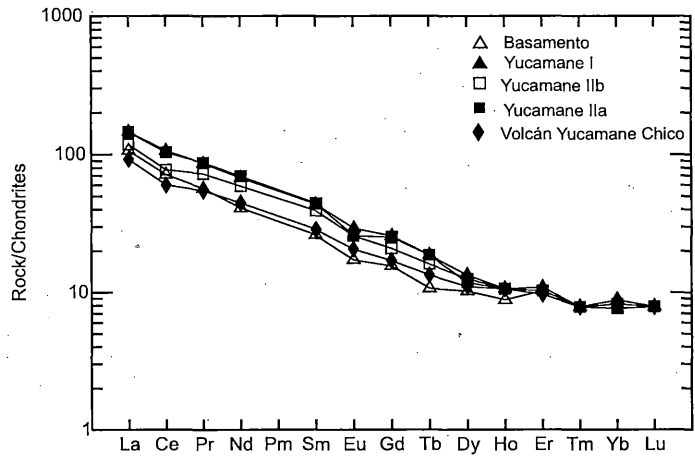
La ausencia y/o leve anomalía negativa en Eu puede indicar que este elemento en parte no ha sido incorporado en la plagioclasa, y más bien puede reflejar fuertes condiciones de oxidación donde todo el Eu está en forma de  $Eu^{3+}$  (Davidson *et al.*, 1990).

Por su parte los espectros multielementos de las rocas del Yucamane y los volcanes Yucamane Chico y Calientes han sido normalizados con relación al manto

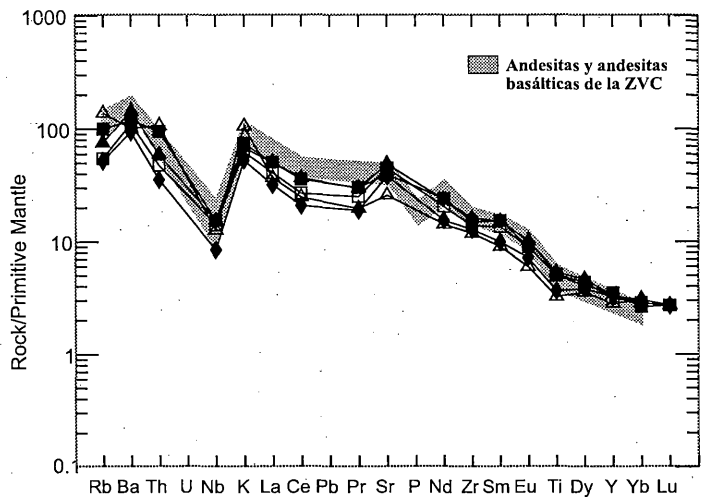
primitivo (Fig. 14). Los valores de normalización son de Sun & McDonough (1989). Las rocas que figuran son las menos diferenciadas (andesitas basálticas y andesitas) de cada volcán. En este diagrama las rocas en general son caracterizadas por un fuerte enriquecimiento en LILE (K, Rb, Ba, Th) y Tierras Raras Ligeras (LREE) con relación a las Tierras Raras Pesadas (HREE). El enriquecimiento de estos elementos incompatibles es característico de un manto fuente de tipo enriquecido y/o una contaminación por la corteza continental (Wilson, 1989).

Por otro lado, la existencia de anomalías negativas en HFSE (principalmente en Ti y Nb), es clásico de la serie calco-alcalina de zonas de subducción y puede ser interpretada como debido a una estabilidad de las fases residuales (ferro-titaníferas y/o anfíbol) en el sólido residual (Wilson, 1989). Sin embargo el enriquecimiento en K, Rb, Ba y las anomalías negativas en P y Ti sugieren un importante rol jugado por el apatito, titanomagnetita y la mica durante la diferenciación. La fuerte disminución en MREE y HREE durante la diferenciación puede ser atribuida al fraccionamiento del anfíbol.

*Fig. 13: Espectros de las tierras raras de las andesitas básicas y andesitas del volcán Yucamane normalizadas a Condritas, los valores tomados son de Sun & McDonough, (1989).*



*Fig. 14: Diagrama multielementos de andesitas basálticas y andesitas del volcán Yucamane, normalizadas al manto primitivo de Sun y McDonough (1989).*



## EVOLUCIÓN PETROGENÉTICA

El estudio geoquímico de los elementos mayores y trazas muestra que la evolución de las rocas del volcán Yucamane es principalmente controlado por la cristalización fraccionada, como la petrografía lo había dejado entrever. Los argumentos en favor de una evolución por cristalización fraccionada son la relación directa que existe entre el orden de aparición de los minerales en las rocas de la serie, y ciertas características geoquímicas, como por ejemplo las fuertes variaciones y la no correlación de porcentajes en elementos compatibles (tales como: Sr, V, Co, Cr, Ni) e hidromagmáficos (Rb, Th), característicos de un proceso de cristalización fraccionada (Fig. 14).

La cristalización fraccionada es también puesto en evidencia por las excelentes correlaciones lineales existentes entre los elementos incompatibles. En efecto, correlacionando dos elementos incompatibles (Rb y Th), Fig. 12 el conjunto de rocas del volcán Yucamane y los volcanes Yucamane Chico y calientes muestran un alineamiento sobre una recta de correlación que pasa por el origen. Este comportamiento sugiere un origen co-genético de los magmas y su evolución por cristalización fraccionada.

Por otro lado, las rocas del volcán Yucamane son calco-alcalinos con una característica notable como son los bajos tenores en HREE y el gran fraccionamiento entre las LREE/HREE. Es actualmente admitido que los magmas calco-alcalinos de la ZVC resultan esencialmente de la fusión parcial de la cuña del manto metasomatizado por fluidos derivados de la deshidratación de la corteza oceánica subducida (Gill, 1981), a menudo seguido de una contaminación y/o asimilación por la corteza durante la diferenciación (James, 1982). Estudios recientes efectuados sobre ciertos volcanes de la ZVC, como los volcanes Ollagüe, Parinacota, Payachata, Tata Sabaya y Ubinas (Davidson, *et al.*, 1990; Feeley and Hacker, 1995; de Silva *et al.*, 1993; Rivera, 2000), Fig. 14, muestran la presencia de magmas pobres en HREE e Y, con relaciones Sr/Y elevados con características similares a la serie del volcán Yucamane. El empobrecimiento en Y y HREE en magmas de la ZVC es generalmente atribuido a la asimilación, contaminación y cristalización fraccionada de magmas en la corteza continental inferior cuyo espesor alcanza ~70 km, en presencia del granate (Davidson, *et al.*, 1990).

En este contexto, el fuerte grado de enriquecimiento en elementos incompatibles (Rb, Th, K) de las rocas de la serie podrían provenir de un manto enriquecido, un bajo grado de fusión parcial y/o una contaminación por la corteza. Este último proceso es frecuentemente invocado en la génesis de las andesitas del Perú meridional (Dostal *et al.*, 1977) debido al gran espesor de la corteza continental (~70 km de espesor, James, 1971).

Los magmas que resultan de los procesos descritos anteriormente ascienden por el interior de la corteza continental y vienen acumularse en un reservorio

magmático superficial, donde evolucionan por cristalización fraccionada. Por otro lado, los estudios petrográficos muestran la existencia de minerales que presentan zonaciones inversas (plagioclasas), minerales desestabilizados (anfíboles) y xenocristales. La existencia de estas fases sugiere un reequilibrio químico seguido a una ligera mezcla de magma y un grado de diferenciación en el interior de la cámara magmática superficial.

## EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LAS AMENAZAS VOLCÁNICAS

La evaluación de las amenazas está basada en el estudio estratigráfico, el cartografiado de los depósitos eruptivos recientes, el grado de recurrencia de los eventos, la interpretación de imágenes de satélite, y datos sobre direcciones de vientos a niveles de la troposfera y estratosfera (5000 y 26500 m de altura) obtenidos desde los años 1979 a 1998, efectuado por el CPNTC (Instituto Geofísico del Perú), con datos del NCEP y NCAR (Mariño, 2002).

Según los datos de direcciones de vientos, a los 5000 m estos predominan hacia el SO y SE, en forma complementaria hacia el sur. Mientras que a los 26500 m predominan hacia el este (Fig. 15). Estos vientos durante erupciones explosivas controlarían la dispersión de las tefras.

Durante una reactivación del volcán Yucamane se presentan cuatro tipos principales de amenazas volcánicas que afectarían a los más de 9000 habitantes (Tabla 2) que viven dentro de un radio de 16 km alrededor del volcán, principalmente en el pueblo de Candarave (11 Km al SO del volcán), donde habitan cerca de 3615 pobladores (INEI, 1994). Asimismo afectarían los poblados de Cairani, Camilaca, Huanuara, Quilahuani, Susapaya, Ticaco, entre otros. Además se verían afectadas muchas obras de infraestructura de riego (principalmente canales) y de consumo humano, obras viales (como un tramo de la Carretera Binacional, Ilo-La Paz y las carreteras afirmadas como la de Tacna-Tarata-Candarave-Puno), e importantes lagunas como Aricota, Suches y Vilacota (principales patrimonios hídricos del sector).

Las amenazas volcánicas comprenden:

1) Caída de téfras, se distinguen dos casos: emisiones de cenizas (Fig. 15) y proyecciones balísticas; hipótesis basada en las cenizas y lapilli finos recientes que yacen en la altiplanicie volcánica (principalmente aquellos localizados en el flanco sur del volcán) y dentro de las quebradas que drenan del volcán Yucamane. Así como bloques balísticos de 3 m de diámetro localizados a 0.5 km al oeste del cráter (Fig. 8).

2) Flujos piroclásticos (Fig. 16). Se presentan tres casos:

*Flujos de bloques y cenizas que pueden ser generados por el crecimiento y destrucción de domos.*

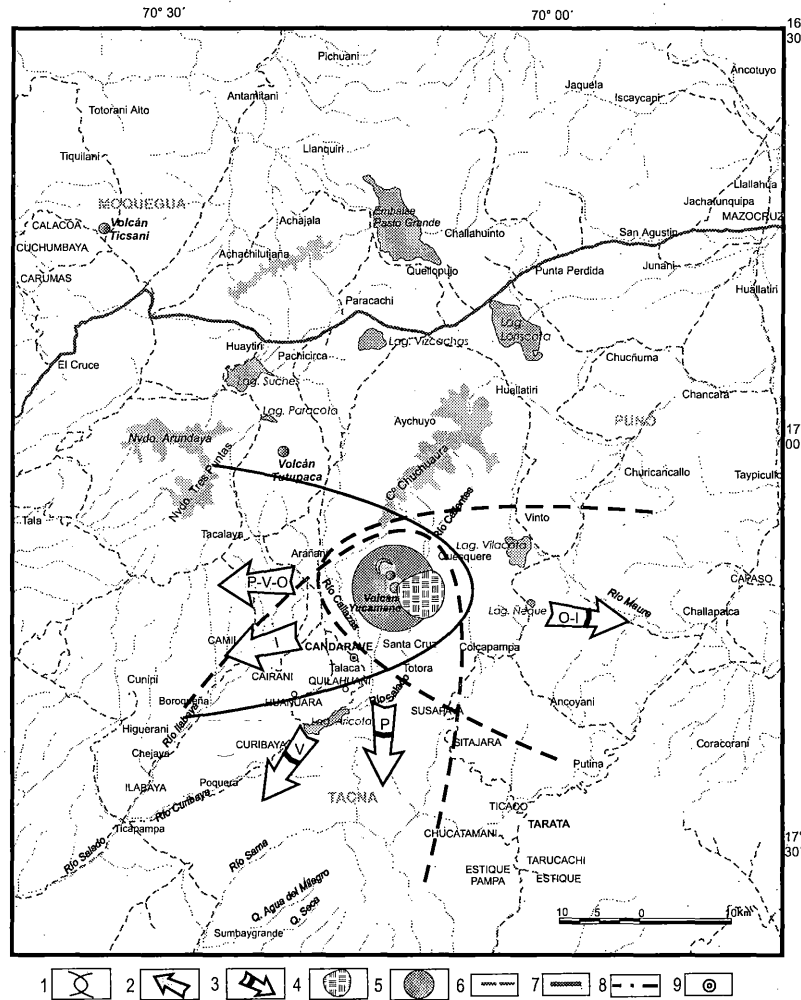


Fig. 15: Mapa preliminar de Amenaza Volcánica por caída de téfras y proyecciones balísticas: (1) Área con mayor probabilidad de ser afectada por caídas de lapilli y cenizas. (2) Direcciones predominantes de vientos según datos a nivel estratosfera obtenidos desde los años 1979-1998 por el Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima (IGP), con datos del NCEP y NCAR: 2a. A 5000 m los vientos se dirigen hacia el SO, S y SE; 2b. A los 26500 m los vientos se dirigen hacia el Este. Letras dentro de flechas: P= primavera, V=verano, O=otoño, I= invierno. (3) Área cubierta por una caída de lapilli pómez reciente que mide más de 40 cm. (4) Área que podría ser afectada por proyectiles balísticos y depósitos freatomagmáticos. (5) carreteras. (6) Vía principal Ilo-La Paz. (7) límite departamental. (8) Provincia.

TABLA 2

Población censada total y estimada, y total de viviendas, localizadas entre 9 y 35 km al sur, SO y SE del volcán Yucamane (Datos tomados de INEI, 1994).

PROVINCIAS	DISTRITOS	CENSO DEL 11/07/1993	POBLACIÓN ESTIMADA AL 2002	TOTAL DE VIVIENDAS
CANDARAVE	Candarave	3482	3615	936
	Camilaca	2306	2575	385
	Cairani	1529	1515	605
	Huanuara	830	836	30
	Quilahuani	994	1076	229
	<b>TOTAL</b>	<b>9141</b>	<b>9617</b>	<b>2185</b>
TARATA	Curibaya	273	283	257
	Tarata	4151	4229	996
	Susapaya	981	996	305
	Sitajara	354	371	128
	Chucatami	438	463	149
	<b>TOTAL</b>	<b>6197</b>	<b>6342</b>	<b>1835</b>

Basado en la presencia de variados depósitos de flujos de cenizas y bloques de 2 a 12 m de espesor que yacen de 5 a 7 km al sur del cráter.

*Flujos de escorias* que pueden ser generados por erupciones vulcanianas, como aquel depósito visible en las quebradas Honda y Campanani (de 6 a 7.5 km al sur del cráter).

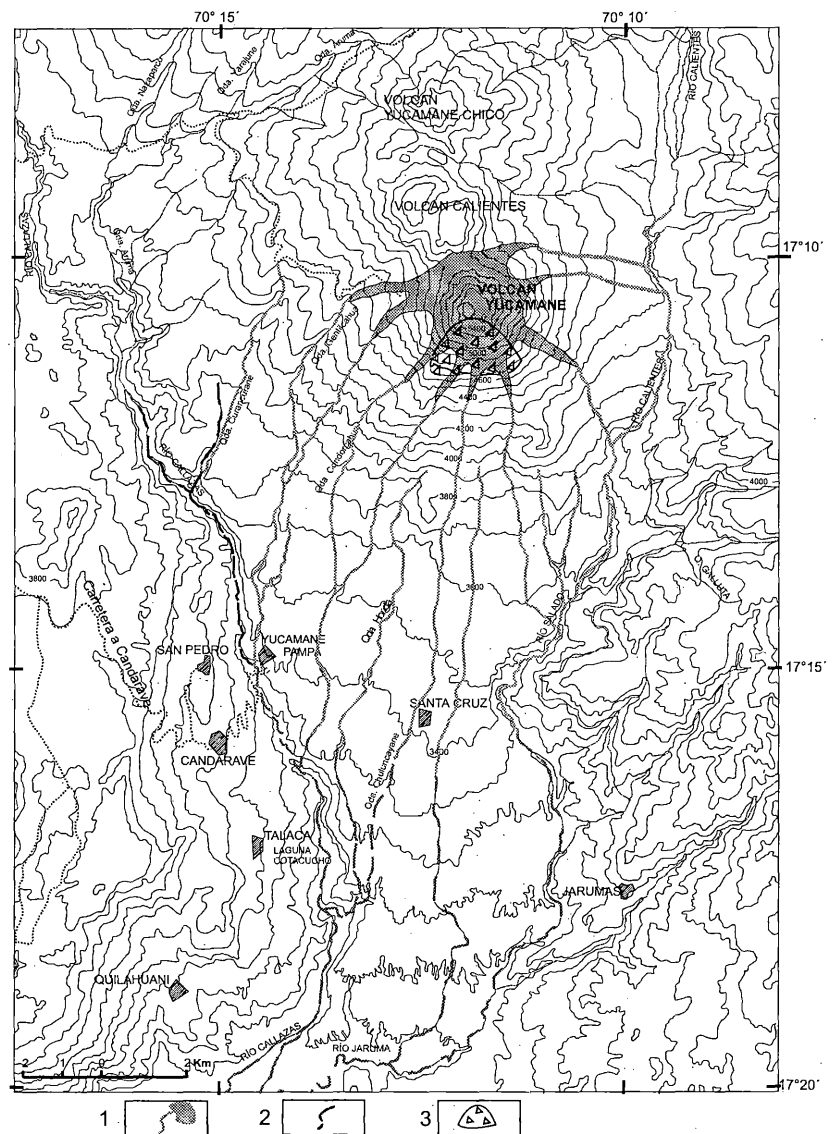
*Oleadas piroclásticas*, basada en un depósito de oleada que precedió al emplazamiento de uno de los flujos piroclásticos recientes que yace en el flanco sur del volcán (Quebrada Honda), producto de una erupción explosiva.

3) Lahares, que pueden ser producidos en periodos de lluvias excepcionales, o debido al contacto del material volcánico con la nieve que yace desde diciembre a abril sobre la cumbre del volcán y/o con el agua de infiltración que aflora en las quebradas del flanco sur. Además están basados en los flujos de detritos que yacen en las quebradas del flanco sur.

4) Aunque no se han distinguido depósitos de avalanchas de escombros provenientes del algún colapso del volcán Yucamane, sin embargo se infiere que estas pueden producirse por el colapso de una parte de la cumbre (considerando que el flanco sur es delgado y muy fracturado), esto en el caso de una erupción violenta o del crecimiento de un domo dentro del edificio y/o en el cráter del volcán.

En base al estudio efectuado se presentan dos mapas de amenazas volcánicas preliminares (Figs. 15 y 16) que muestran las áreas que pueden ser afectadas en caso de una reactivación del volcán, durante erupciones explosivas con bajo a moderado IEV (Newhall & Self, 1982). Estos mapas muestran diversas áreas que podrían ser afectados por una futura actividad del volcán, así como el tipo de amenaza al que están expuestas, suponiendo que el comportamiento eruptivo sea similar al que ha presentado el Yucamane a lo largo del tiempo geológico e histórico. El objetivo de estos mapas es planificar el uso

Fig. 16: Mapa preliminar de Amenaza Volcánica por flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros: (1) Área y quebrada que serían potencialmente afectadas por flujos piroclásticos durante erupciones moderadas (IEV= 4-6). (2) Valles que serían potencialmente afectados por lahares. (3) Zona que sería potencialmente afectada por derrumbes y/o colapso durante erupciones con moderados a altos IEV (> 4).





de tierras y determinar las áreas que deberían ser evitadas durante erupciones.

## CONCLUSIONES

1) El Yucamane se ha construido en dos períodos: Yucamane I y Yucamane II. Este último período es dividido en dos fases: «Cono de la Cumbre» y «Caldera Reciente». El Yucamane I, constituye el primer período durante el cual se emplazaron flujos de lavas andesíticas hace  $\sim 0.38 \pm 0.3$  Ma. A.P. Un segundo período denominado como Yucamane II se divide en dos fases: «Cono de la Cumbre» durante el cual se produjo en emplazamiento de flujos de lavas dacíticas y andesíticas que forman del cono superior del volcán. En una segunda fase que va desde el Pleistoceno superior al reciente, denominada como «Caldera Reciente» se produjo el emplazamiento de variados depósitos de flujos piroclásticos y caídas de cenizas y lapilli pómez de poco volumen ( $< 1 \text{ km}^3$ ) que yacen principalmente en el flanco Sur y SE del estratocono, y que dieron lugar a la formación del cráter actual. Uno de los depósitos recientes ha sido datado en 3,270 años A.P.

2) El comportamiento eruptivo mostrado por el volcán Yucamane durante el Pleistoceno superior, Holoceno y la época histórica (fase Caldera Reciente), fue moderadamente explosiva con erupciones que emitieron productos poco voluminosos ( $< 1 \text{ km}^3$ ), estas erupciones fueron del tipo freatomagmática, vulcaniana y subplininas; así como episodios extrusivos, con el crecimiento y destrucción de domos.

3) Las rocas del complejo volcánico Yucamane son constituidos de andesitas basálticas, andesitas, dacitas (54.30-64.44 %  $\text{SiO}_2$ ), pertenecientes a la serie calcoalcalina, altamente potásica. Los procesos magmáticos que intervinieron en la evolución de la serie incluyen posiblemente cristalización fraccionada y a veces mezcla de magmas producidos en una cámara magmática superficial.

4) Considerando las características geoquímicas de las rocas del volcán Yucamane, y de los volcanes Yucamane Chico y Calientes, y el contexto geodinámico peruano existe una hipótesis que permitiría explicar la génesis de estas rocas, la cual hace mención de una contaminación y cristalización fraccionada de magmas provenientes del manto en la corteza continental inferior, modelo propuesto por Davidson, *et al.*, (1990).

5) Los estudios estratigráficos, cartografiado geológico sumados a la recopilación de los registros históricos, ayudaron determinar las amenazas potenciales que se ciernen sobre los poblados y obras de infraestructura localizados a menos de 9 km al S, y SO del volcán Yucamane. Estas amenazas son por: caídas de tefras, flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros.

6) En términos de riesgo, los centros poblados localizados a menos de 14 km al pie del flanco sur, principalmente los poblados de la Provincia de Candarave, así como áreas agrícolas, obras de infraestructura y fuentes de aguas para consumo humano y regadío se verían seriamente afectadas en caso de una erupción explosiva moderada (ej. vulcaniana).

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado por la Dirección de Geología Regional del INGEMMET, en cooperación con el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA). Nosotros agradecemos a los Drs. José Machare y Victor Carlotto, Director Ejecutivo y Director Adjunto del INGEMMET, respectivamente, por facilitar y permitir la publicación del presente artículo. Además agradecemos a la Dra. Catherine Hickson, Dra. Jennifer Getsinger, por el apoyo con los análisis químicos y datación  $\text{C}^{14}$ , así como a la Ing. Sandra Villacorta y al Sr. José Vilchez, por su apoyo en los trabajos de campo y gabinete.

## REFERENCIAS

- DAVIDSON J.P., MCMILLON N.J., MOORBATH S., WÖRNER G., HARMON R.S. & LOPEZ ESCOBAR L. (1990).- The nevados de Payachata volcanic region ( $18^\circ\text{S}/69^\circ\text{W}$ , N. Chile)II. Evidence for widespread crustal involvement in Andean magmatism, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 105;412-432.
- DE LA CRUZ N & DE LA CRUZ O. (2000).- Mapa Geológico del Cuadrángulo de Tarata, a escala 1:50,000. INGEMMET.
- DE SILVA S.L., DAVIDSON J.P., CROUDACE I.W. & ESCOBAR A. (1993).- Volcanological and petrological evolution of volcan Tata Sabaya, SW Bolivia *Journal Volcanology and Geothermal Research*, 55;305-335.
- DOSTAL J., DUPUY C. & LEFEVRE C. (1977).- Rare earth element distribution in Plio-Quaternary volcanic rocks from southern Peru; *Lithos* 10;173-183
- EISSEN J.P., MONZIER M., COTTEN J., HALL M.L., ROBIN C., SAMANIEGO P., THOURET J.C., GOURGAUDA., LEGROSF., NAVARRO P., LE PENNEC J.L. & BOURDON E. (1996).- Adakites from Ecuador and Peru quaternary volcanoes: Preliminary interpretation. I Congreso Latinoamericano «volcanes, sismos y prevención» Lima y Arequipa, p.38-42.
- FIDEL S. & HUAMANI A. (2001).- Mapa Preliminar de Amenaza Volcánica Potencial del Yucamane. *Bol. 26, Serie C*, INGEMMET, 158 p.
- FRANCE L. (1985).- Geochronology, stratigraphy, and petrochemistry of the Upper Tertiary volcanic Arc, Southernmost Peru, central Andes». Diss., Queen's University, Kingston, Notario, Canada.

- FEELEY T.C. & HACKER M. D.** (1995).- Intracrustal derivation of Na-rich andesitic and dacitic magmas : an exemple from volcan Ollagüe, Andean Central Volcanic Zone. *Journal of Geology*, 103;213-225.
- GERBE M.-C. & THOURET J.-C.** (2004).- Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990-1998 explosive activity of the Nevado Sabancaya in south Peru. *Bulletin of Volcanology*, accepted.
- GILL J.B.** (1981).- Orogenic Andesites and Plate Tectonics. Springer-Verlag, Berlin. p. 390.
- INEI** (1994).- Censos Nacionales 1993 (IX de Población IV de vivienda). Resultados definitivos a nivel provincial y distrital: Provincias Tacna, Candarave, Jorge Basadre y Tarata. Lima 246 p.
- IRVINE TN & BARAGAR WRA** (1971).- A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth. Sci.* 8:523-548.
- JAEN LA TORRE H.** (1965).- Geología del Cuadrángulo de Tarata. *Boletín N° 11*, Serie A, INGEMMET.
- JAMES E. D.** (1971).- Plate tectonic Model for the Evolution of the Central Andes. *Geol. Soc. of Amer. Bull.* v.82,p.3325-3346.
- JAMES E. D.** (1982).- A combined O, Sr, Nd, and Pb isotopic and trace element study of crustal contamination in central Andean lavas, I. Local geochemical variations. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 57;47-62.
- LEGENDRE CH.** (1999).- Pétrogenèse du volcan «Misti Moderne»(Sud Pérou): essai de caractérisation de l'évolution pétro-géochimique et chronologique, mémoire Institut Géologique Albert de Lapparent, France, p.88.
- MARIÑO J.** (2002).- Mapa de zonificación de peligros volcánicos del sur del Perú, para Índice de Eplosividad Volcánica 6 (escenario alto). *Instituto Geofísico del Perú. inf. int.* 28 p.
- MORCHE W. & DE LA CRUZ N.** (1994).- Geología y Petrografía de los Volcanes Pleistocénicos Yucamane y Tutupaca (Tacna). Resúmenes Extendidos, VIII Congreso Peruano de Geología, p. 209-213.
- NEWHALL C.G., & SELF S.** (1982).- The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research.* V.87, p. 1231 -1238.
- RIVERA M., THOURET J.C. & GOURGAUDA.** (1998).- Ubinas, el volcán mas activo del sur del Perú desde 1550: Geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Bol. de la Soc. Geol. del Perú* v.88;53-71
- RIVERA P. M.** (2000).- Genèse et évolution de magma émit au cours de la histoire éruptive récent du volcan Ubinas (sud du Pérou). Mémoire de DEA, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France, 56 p.
- SIMKIM T. & SIEBERT L.** (1994). - Volcanoes of the World - A Regional Directory, Gazeteer and chronology of volcanism during the last 10,000 year. Smithsonian Institution, Global Volcanism Program, Washington DC.
- SUN S. & MCDONOUGH W.F.** (1989).- Chemical and isotopic systematics of oceanics basalts: Implications for mantle composition and processes. Magmatism in the Ocean Basin, *Geol. Soc. Sp. Publ.*, 42, 313-345.
- THOURET J-C, DÁVILA J. & EISSEN J.P.** (1999).- Largest explosive eruption in historical times in the Andes at Huaynaputina volcano. A.D. 1600, southern Peru, *Geology*, v. 27. p. 435-438.
- THOURET J-C, JUVIGNE E, MARIÑO J., MOSCOLM., LOUTSCHI, DÁVILA J., LEGELYE-PADOVANI A., LAMADON S., RIVERA M.** (2002).- Late Pleistocene and Holocene Tephro-Stratigraphy and Chronology in Southern Peru. *Bol. de la Soc. Geol. del Perú* v.93,45-61.
- WILSON M.**-(1989).- Igneous Petrogenesis. Unwin Hyman, London. pp. 466.
- ZAMACOLA & JÁUREGUI** (1804).- En Barriga WM. 1954. Los Terremotos de Arequipa, 332 p.

#### APÉNDICE 1

Características y localización de la datación C<sup>14</sup>

CODIGO	PROCEDENCIA:	DESCRIPCION	ANALISIS
YU-C14 01	Al pie del flanco Este del volcan Yucamane, en la carretera Candarave-Calientes N8098575 E375346	Muestra de carbon encontrado en la base de una caída de lapilli pomez con características freatomagmaticas que aflora al Este del Yucamane. El deposito es de color amarillento rojizo y tiene 38 cm de espesor..	Isotraces Radiocarbon Laboratory/University of Toronto-2004 Edad: 3.270 ± 50 años A:P.