

**INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 65**



Geología y Evaluación de Peligros del Complejo Volcánico Yucamane - Calientes (Candarave - Tacna)

**Lima, Perú
2018**



**INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 65**

Geología y Evaluación de Peligros del Complejo Volcánico Yucamane - Calientes (Candarave - Tacna)

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico

Equipo de Investigación:

**Marco Rivera Porras
Pablo Samaniego Eguiguren
Jessica Vela Valdez
Jean-Luc Le Penne**

**Lima, Perú
2018**

INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 65

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2018-16617

Razón Social: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)
Domicilio: Av. Canadá N° 1470, San Borja, Lima, Perú
Primera Edición, INGEMMET 2018
Se terminó de imprimir el 30 de octubre 2018 en los talleres de INGEMMET
Tiraje: 100

© **INGEMMET**

Derechos Reservados. Prohibida su reproducción

Presidente Ejecutivo (e): Henry Luna Córdova.

Gerente General (e): Yelena Alarcón Butrón.

Comité Editor: Jorge Chira Fernández, Bilberto Zavala Carrión, Verónica Falcone
Mispireta.

Dirección encargada del estudio

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico: Bilberto Zavala Carrión.

Unidad encargada de edición

Unidad de Relaciones Institucionales: Verónica Falcone Mispireta.

Revisor Externo: Pablo Samaniego Eguiguren (IRD).

Corrección gramatical y de estilo: Consuelo Meza Lagos.

Diagramación: Zoila Solis Yzaguirre.

Fotografía de la carátula: Vista del poblado de Candarave y al fondo los volcanes
Yucamame, Calientes y Yucamane Chico.

Referencia bibliográfica

Rivera, M.; Samaniego, P.; Vela, J. & Le Pennec, J.-L. (2018) - Geología y evaluación de
peligros del Complejo Volcánico Yucamane - Calientes (Candarave - Tacna). *INGEMMET,
Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 65, 128 p., 2 mapas.

Publicación disponible en libre acceso en la página web (www.ingemmet.gob.pe). La
utilización, traducción y creación de obras derivadas de la presente publicación están
autorizadas, a condición de que se cite la fuente original ya sea contenida en medio
impreso o digital (GEOCATMIN - <http://geocatmin.ingemmet.gob.pe>).

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella
aparecen son de exclusiva responsabilidad del equipo de investigación.

Contenido

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
CAPÍTULO I	5
INTRODUCCIÓN	5
1.1 UBICACIÓN	6
1.2 VÍAS DE ACCESO.....	6
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	8
1.4 METODOLOGÍA.....	8
1.5 ESTUDIOS ANTERIORES EN EL ÁREA DE TRABAJO.....	10
1.6 CLIMA E HIDROLOGÍA.....	11
1.6.1 Temperatura	11
1.6.2 Pluviometría	11
1.6.3 Hidrología y Drenaje	13
1.6.4 Vientos	13
1.7 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS.....	15
1.7.1 Población y vivienda	15
1.7.2 Actividades económicas principales	19
CAPÍTULO II	23
GEOMORFOLOGÍA.....	23
2.1 GEOFORMAS DE ORIGEN VOLCÁNICO.....	23
2.1.1 Flujos de lavas de volcanes del Mioceno (Mi-la)	23
2.1.2 Colinas de ignimbritas del Mioceno (Mi-ig)	23
2.1.3 Flujos de lavas del Yucamane Chico (La-Yu).....	23
2.1.4 Altiplanicie ignimbrítica del Pleistoceno (Pl-ig).....	26
2.1.5 Flujos de lava del volcán Calientes (Lav-Ca1-2).....	26
2.1.6 Flujos de lava del volcán Yucamane (La-Yu1-2).....	26
2.1.7 Cráter	27
2.1.8 Domos de lava (D)	28
2.1.9 Zona de depósito de avalancha de escombros (Av).....	28
2.1.10 Altiplanicie y ladera de volcanoclásticos (Vol).....	29
2.1.11 Altiplanicie de caída de pómez (Pi).....	29
2.1.12 Abanico piroclástico (A-pi)	29
2.2 DE ORIGEN GLACIAR.....	29
2.2.1 Geoformas de erosión.....	29
2.2.2 Geoformas de acumulación	30
2.3 OTRAS GEOFORMAS	31
2.3.1 Valles	31
2.3.2 Pampas	31
CAPÍTULO III	33
GEOLOGÍA.....	33
3.1 MARCO TECTÓNICO REGIONAL Y LOCAL.....	33

3.1.1	Estructuras tectónicas regionales	33
3.1.2	Estructuras tectónicas locales.....	33
3.2	ESTRATIGRAFÍA DEL SUBSTRATO (PRE-YUCAMANE)	33
3.2.1	Formación Labra (Jurásico) (<i>Js-La</i>)	33
3.2.2	Formación Hualhuani (Jurásico superior-Cretáceo inferior) (<i>Ki-Hu</i>)	37
3.2.3	Grupo Toquepala (Cretáceo Superior-Eoceno) (<i>KsP-To</i>).....	37
3.2.4	Formación Tacaza (Oligoceno) (<i>P-Ta – P-Ta2</i>)	37
3.2.5	Formación Huaylillas (Mioceno inferior-superior) (<i>Nm-Hu1-3</i>).....	38
3.2.6	Grupo Barroso (Mioceno-Pleistoceno) (<i>N-LE; N-NA; N-Sa</i>)	39
3.2.7	Volcán Yucamane Chico (<i>Np-Yu</i>)	41
3.3	ESTRATIGRAFÍA Y EVOLUCIÓN DEL COMPLEJO VOLCÁNICO YUCAMANE-CALIENTES	42
3.3.1	Estratovolcán Calientes (<i>Pl-Ca</i>): Pleistoceno Superior	42
3.3.2	Volcán Yucamane.....	46
3.4	OTROS DEPÓSITOS	67
3.5	ERUPCIONES HISTÓRICAS	67
CAPÍTULO IV		69
PETROGRAFÍA DE PRODUCTOS VOLCÁNICOS		69
4.1	VOLCÁN YUCAMANE CHICO	69
4.1.1	Andesitas	69
4.1.2	Dacitas	69
4.2	VOLCÁN CALIENTES	69
4.2.1	Andesitas	69
4.2.2	Dacitas	69
4.3	VOLCÁN YUCAMANE.....	73
4.3.1	Andesitas básicas	73
4.3.2	Andesitas	74
4.3.3	Dacita	76
CAPÍTULO V		79
GEOQUÍMICA DE ROCAS		79
5.1	MÉTODO ANALÍTICO	79
5.2	CLASIFICACIÓN DE LA SERIE	79
5.3	EVOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS MAYORES	81
5.4	DIAGRAMAS DE VARIACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA.....	83
5.5	DIAGRAMAS MULTIELEMENTOS	83
5.6	DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS	87
5.7	DIAGRAMAS DE RATIOS.....	87
5.8	ISÓTOPOS DE $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	87
5.9	EVOLUCIÓN PETROGENÉTICA	91
CAPÍTULO VI		93
EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS VOLCÁNICOS		93
6.1	TIPOS DE PELIGROS VOLCÁNICOS	93
6.1.1	Peligros por caídas de tefras	93
6.1.2	Peligros por flujos y oleadas piroclásticas	94
6.1.3	Peligros por flujos de barro (lahares)	95
6.1.4	Peligros por avalanchas de escombros	95
6.1.5	Peligros por flujos de lava	96
6.2	ESCENARIOS ERUPTIVOS ANTE UNA POSIBLE REACTIVACIÓN DEL VOLCÁN YUCAMANE	96
6.2.1	Primer escenario: Erupción vulcaniana (IEV 1-2)	96
6.2.2	Segundo escenario: erupción vulcaniana o subpliniana (IEV 3).....	97
6.2.3	Tercer escenario: crecimiento de domo y/o explosión dirigida (Blast)	98

6.2.4	Cuarto escenario: erupción efusiva con emisión de lavas	98
6.2.5	Quinto escenario: erupción pliniana (IEV 4-5)	98
6.3	MAPA DE PELIGROS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO YUCAMANE-CALIENTES	99
6.3.1	Mapa proximal de peligros volcánicos múltiples	99
6.3.2	Mapa de peligros por caídas piroclásticas	103
6.3.3	Mapa de peligros por lahares y avalanchas de escombros	106
CONCLUSIONES		109
RECOMENDACIONES		111
BIBLIOGRAFÍA		113
RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES		119

RESUMEN

El complejo volcánico Yucamane-Calientes (CVYC) se encuentra localizado en la zona alto andina del departamento de Tacna, en la Cordillera Occidental de los Andes. El estudio geológico y el análisis de imágenes satelitales y fotográficas aéreas muestran que dicho complejo está conformado por dos estratovolcanes alineados en dirección NNO-SSE, tales como Calientes (4980 msnm) y Yucamane (5495 msnm).

Los volcanes mencionados se han construido al sur de un estratovolcán muy antiguo y parcialmente destruido denominado Yucamane Chico (5356 msnm), sobre secuencias de lavas del Mioceno. La datación radiométrica de una lava de la base de dicho volcán arrojó una edad K/Ar de 5.5 ± 0.08 Ma. El estratovolcán Calientes se ha construido en cinco etapas: "Calientes I", durante el cual se produce el emplazamiento de flujos de lavas andesíticas que yacen en la base del volcán; "Calientes II", durante el cual se emplaza una secuencia de flujos de pómez y ceniza "Basal", dacítica no soldada, que aflora al sur del complejo, generada por un evento explosivo paroxismal (colapso de caldera); "Calientes III", está constituido por flujos de lavas andesíticas y dacíticas que forman el cono inferior de dicho volcán. Una lava de esta etapa ha sido datada en 126 ± 3 ka; "Calientes IV", comprende la formación del cono superior del volcán —localizado entre los 4800 y 5350 msnm—, y consiste en una intercalación de lavas andesíticas y dacíticas; "Calientes V", comprende el emplazamiento de un complejo de domos dacíticos de aproximadamente 400 m de alto por 1000 m de diámetro. Durante o antes de la etapa "Calientes IV", se emplaza el volcán Yucamane, el cual se ha construido en tres periodos: "Yucamane I", conformado por una secuencia de flujos de lavas andesíticas de aproximadamente 300 m de espesor que yacen en la base del volcán. Posteriormente, parte de este cono colapsó y generó depósitos de avalancha de escombros con una extensión de más de 12 km al sur, SE y E del volcán Yucamane. En un segundo periodo, denominado "Yucamane II", se produjo el reiterado crecimiento de domos que luego colapsaron y generaron flujos piroclásticos de bloques y cenizas andesíticas y dacíticas, que se depositaron en las quebradas de los flancos sur, SO y SE del Yucamane, a más de 9 km del cráter. Uno de los primeros depósitos emitidos, corresponde a un depósito de flujo tipo *blast* que fue datado en 36450 ± 250 ka. El

"Yucamane III", se inició con la formación del cono de la cumbre, entre los 3900 y 5495 msnm, ligada principalmente a una actividad efusiva que emite flujos de lava andesítica y dacítica. Una lava de la base del estratocono superior fue datada en 23 ± 1 ka, mientras que una lava joven que yace al pie del flanco SE fue datada en 3 ± 2 ka. Durante el Holoceno, el Yucamane presentó una actividad explosiva variada, de tipo vulcaniana y subpliniana que ha emplazado flujos y caídas piroclásticas. Los depósitos de la última erupción subpliniana corresponden a un depósito de caída y flujo piroclástico que datan en 3270 años AP.

El estudio petrológico y geoquímico de las rocas del volcán Calientes muestra que estas rocas son de composición andesítica y dacítica (60.1-67.7 wt.% SiO_2), mientras que las rocas del volcán Yucamane corresponden a andesitas básicas, andesitas y dacitas (53.4-66.9 wt.% SiO_2). Todas las muestras analizadas pertenecen a la serie calcoalcalina con alto contenido de K (2.3-3.7 wt.% K_2O para rocas del Calientes y 1.4-3.6 wt.% K_2O para rocas del Yucamane). Las rocas del complejo Yucamane-Calientes presentan una gran homogeneidad mineralógica y petrográfica. En efecto, las andesitas y dacitas contienen fenocristales de plagioclasa (que a veces miden hasta 1 cm), anfíbol, biotita, clinopiroxeno, óxidos de Fe-Ti y ocasionalmente ortopiroxeno y olivino. Los cristales de olivinos están únicamente presentes en las andesitas básicas y andesitas. Las andesitas básicas, andesitas y dacitas tienen principalmente una textura porfirítica con una pasta intersertal o microcristalina.

Según el comportamiento geoquímico de las rocas del CVCY, y según el contexto geodinámico ligado a la subducción, los magmas del CVYC provendrían del manto. Las características isotópicas de las rocas del CVYC (razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ elevadas y razones $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ bajas) sugieren que la serie ha evolucionado principalmente por procesos de asimilación-cristalización fraccionada (AFC), en una cámara magmática superficial. De otro lado, las rocas del CVYC poseen bajos valores en Y y HREE comparadas con los magmas calcoalcalinos "clásicos" de arco. Esas características pueden reflejar la asimilación o mezcla de magmas basálticos "padres", que provienen del manto, con magmas generados en la base de la corteza (magmas

generados a alta presión), que contienen granate (\pm anfíbol) en el residuo de fusión, en el contexto de una corteza continental engrosada (~70 km de espesor).

La evidencia geológica muestra cuatro tipos principales de peligros volcánicos: peligros por caídas de tefras, por emplazamiento de flujos y oleadas piroclásticas, por lahares, por avalanchas de escombros y por flujos de lava. En base a los datos geológicos se ha propuesto cinco escenarios eruptivos en caso de una eventual reactivación volcánica del Yucamane, desde el más posible al menos posible; estos son: el primer escenario considera una erupción vulcaniana leve a moderada (IEV 1-2); el segundo escenario, una erupción explosiva tipo vulcaniana o subpliniana (IEV 3); un tercer escenario, el

crecimiento de un domo y/o colapso de un sector del volcán que puede generar avalanchas de escombros; un cuarto escenario considera la emisión de flujos de lava; y un quinto escenario considera una erupción explosiva de tipo pliniana (IEV 4-5).

En caso de una eventual reactivación del volcán Yucamane o volcán Calientes, las zonas más propensas a ser afectadas por los productos como caídas de cenizas y eventuales lahares sería principalmente la provincia de Candarave (11 km al SO del volcán), donde habitan cerca de 3482 pobladores, muy cerca a distritos, caseríos/parajes, terrenos de cultivo, pastizales y obras de infraestructura. Asimismo, se vería afectado el ganado camélido que habita la zona.

ABSTRACT

The Yucamane-Calientes volcanic complex (YCV) is located within a high plateau in the Western Cordillera of the Andes in southern Peru (Department of Tacna). Geological study, analysis of satellite images, and aerial photographs show that this complex is made up of two stratovolcanoes aligned to the NNW-SSE. From northwest to southeast, they are Calientes (4980 masl) and Yucamane (5495 masl). These volcanoes were formed to the south of an older, partially destroyed stratovolcano called Yucamane Chico (5356 masl). The lava at the base of Yucamane Chico is dated at 5.5 ± 0.08 Ma. Calientes stratovolcano was built in five stages: "Calientes I", during which an andesite lava flow visible in the base of the volcano was emplaced; "Calientes II", during which caldera collapse emplaced a sequence of non-welded, dacitic pumice-and-ash-flow deposits ("Callazas" ignimbrite) to the south of the complex. "Calientes III" consists of andesitic and dacitic lava flows that formed the lower cone of the volcano. One such lava yielded an age of 126 ± 3 ka. "Calientes IV" consists of an intercalation of andesitic and dacitic lavas flow that form the upper cone of the volcano, between 4800 masl and 5350 masl. "Calientes V" comprises a dacitic dome complex ~400 m high and 1000 m in diameter. During or before the "Calientes IV" stage, Yucamane volcano began its activity, which consists of three periods. "Yucamane I" consists of a sequence of approximately 300 m thick andesitic lavas flows visible at the base of the volcano. Subsequently, part of the cone collapsed, generating debris-avalanche deposits that extends more than 12 km to the S, SE, and E of Yucamane volcano. A second period, "Yucamane II", consists of the repeated growth and collapse of domes generating andesitic and dacitic block-and-ash-flow deposits. Such flows were emplaced in ravines on the S, SW, and SE flanks of Yucamane and reached more than 9 km from the crater. One of the first deposits of the period corresponds to a "blast" flow deposit dated at 36450 ± 250 ka. «Yucamane III» begins with the effusion of andesitic and dacitic lava flows, which form the summit cone between 3900 masl and 5495 masl. A lava from the base of the summit cone was dated at 23 ± 1 ka, while a young lava visible at the foot of the SE flank was dated at 3 ± 2 ka. During the Holocene, Yucamane produced Vulcanian and sub-plinian explosive activity which emplaced pyroclastic-flow

and tephra-fall deposits. The deposits of the last sub-plinian eruption correspond to pumice-lapilli-fall and pumice-and-ash-flow deposits dated at 3270 yrs BP.

The Calientes rocks are andesites and dacites (60.1-67.7 wt.% SiO_2), while the rocks of Yucamane are low-silica andesites, andesites, and dacites (53.4-66.9 wt.% SiO_2). All the samples analyzed are within the high-K, calc-alkaline field (2.3-3.7 wt.% K_2O for Calientes and 1.4-3.6 wt.% K_2O for Yucamane). The rocks of the Yucamane-Calientes complex are mineralogically and petrographically very homogeneous. The andesites and dacites have an assemblage of plagioclase (up to 1 cm in size), amphibole, biotite, clinopyroxene, Fe-Ti oxides, and occasional orthopyroxene and olivine. Olivine crystals are only present in low-silica andesites and andesites. The low-silica andesites, andesites, and dacites are usually porphyritic with an intersertal or microcrystalline groundmass.

According to the geochemical characteristics of the rocks of the YCV and the geodynamic context linked to subduction, the magmas of the YCV should come from the mantle. The high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and low $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios suggest that the series evolved mainly by Assimilation-Fractional Crystallization (AFC) mechanisms in a shallow magma chamber. The low concentrations of Y and HREE in the YCV rocks, however, may also reflect the assimilation or mixing of mantle-derived basaltic "parent" magmas with magmas generated under high pressure conditions at the base of the crust. Considering the thickened continental crust (≥ 70 km thick), such a process would result in garnet (\pm amphibole) in the fusion residue.

Geological evidence shows five main types of volcanic hazards: tephra falls, pyroclastic flows, lahars, debris avalanches, and lava flows. Based on the geological data, five eruptive scenarios have been proposed in case of an eventual Yucamane volcanic reactivation. From the most likely to the least likely, these are: a mild to moderate Vulcanian eruption (VEI 1-2); a sub-plinian eruption (VEI 3); the growth of a dome and/or sector collapse of the volcano, which can generate debris avalanches; the emission of lava flows; and an explosive Plinian eruption (VEI 4-5).

In case of a reactivation of Yucamane or Calientes, the area most likely to be affected by ash fall and lahars would be the villages of Candarave Province located 11 km to the S and SW

of the volcano. This area has approximately 3482 inhabitants, as well as cultivated land, pasture, and infrastructure. The camelid livestock that inhabits the high plateau would also be affected.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El volcanismo calcoalcalino, registrado desde el Mioceno hasta el Cuaternario en los Andes del sur peruano, se manifiesta a lo largo de un arco volcánico extenso situado al oeste de la Cordillera Occidental de los Andes. Este arco forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC; de Silva & Francis, 1991) y en él se distinguen conos volcánicos, domos de lava, calderas, estratovolcanes, complejos volcánicos, etc., cuya fase mayor de construcción se desarrolló durante el Mioceno y el Pleistoceno (Sebrier & Soler, 1991; Thouret et al., 2016). Este arco volcánico tiene aproximadamente 50 km de ancho y más de 1000 km de largo, y comprende al territorio del sur de Perú, el occidente de Bolivia y el norte de Chile. En la zona peruana

se ha identificado al menos una docena de estratovolcanes de edad Plio-cuaternaria: Sara Sara, Coropuna, Ampato-Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucamane-Calientes, Purupuruni, Casiri, entre otros. Además, se distinguen numerosos volcanes monogenéticos que corresponden a conos estrombolianos, asociados a emisiones de flujos de lava, como los apreciados en Cotahuasi, Andahua, Orcopampa, Huambo, Yura (Arequipa) y Caylloma. Entre estos, los volcanes Sabancaya, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca y Yucamane son los que se consideran como volcanes activos (Figura 1.1); es decir, son volcanes que han presentado actividad durante los últimos 10 000 años.

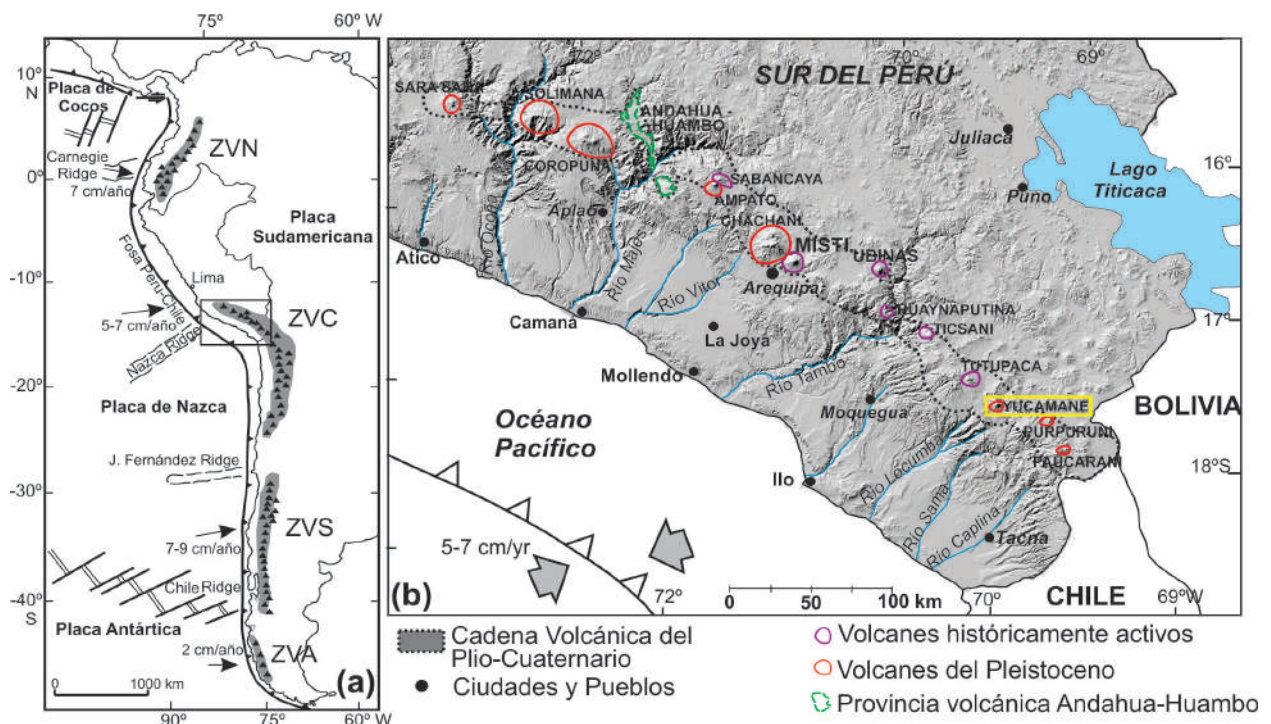


Figura 1.1 (a) Mapa de localización de las zonas volcánicas de Sudamérica: norte (ZVN), central (ZVC), sur (ZVS) y austral (ZVA), modificado por Stern (2004). (b) Sector norte de la ZVC, en el sur del Perú. El volcán Yucamane está localizado en el extremo sur de la cadena volcánica plio-cuaternaria del sur peruano.

El volcanismo calcoalcalino en los Andes es el resultado de la subducción de la placa oceánica de Nazca, bajo la placa continental sudamericana. Este volcanismo se produce entre 190 y 280 km al este del borde occidental de la placa sudamericana, de forma paralela a la fosa peruano-chilena. La dirección de convergencia de la Placa de Nazca bajo el continente sudamericano es de N79°E, con una velocidad media de 5-6 cm/año (Norabuena et al., 1999).

Los estudios geológicos y vulcanológicos efectuados desde la década de los años 90 y el inicio del 2000 en el sur del Perú, han permitido mostrar la intensa actividad volcánica reciente e histórica manifestada por los siete volcanes activos: Sabancaya (Gerbe y Thouret, 2004), Ubinas (Thouret et al., 2005; Rivera et al., 2010), Misti (Thouret et al., 2001), Huaynaputina (Thouret et al., 2002), Ticsani (Mariño y Thouret, 2003), Yucamane (Fidel y Huamani, 2001). Posteriormente, desde el año 2010, existen nuevos estudios geológicos sobre los volcanes activos: Sabancaya (Rivera et al., 2016; Samaniego et al., 2016), Ubinas (Rivera et al., 2014), Misti (Harpel et al., 2011; Tepley et al., 2013; Mariño et al., 2016; Rivera et al., 2017) y Tutupaca (Samaniego et al., 2015; Valderrama et al., 2016) efectuados en su mayor parte dentro del convenio de cooperación existente entre el INGEMMET y el IRD, así como los trabajos de otros grupos de investigación, han permitido complementar y mejorar el conocimiento que se tiene acerca de la actividad volcánica en el Perú.

En épocas históricas, los volcanes activos del arco peruano causaron enormes estragos a varios poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura, localizados en sus inmediaciones. Basta mencionar los daños ocasionados por la erupción paroxismal del volcán Huaynaputina (sur del Perú), en febrero de 1600 d.C.; esta es considerada como la más importante ocurrida en épocas históricas en los Andes, donde perdieron la vida más de 1500 personas (Adams et al., 2001; Thouret et al., 2002). Posteriormente, la reactivación sucesiva de los volcanes Sabancaya (1990-1996; 2016-2018) y Ubinas (2006-2009; 2013-2016), así como el alto grado de exposición de los habitantes de la ciudad de Arequipa (~1 000 000 habitantes) frente a una eventual reactivación del Misti, ha llevado al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), en cooperación con el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia, a elaborar mapas de peligros y a desarrollar un programa destinado a estudios vulcanológicos tendientes a comprender mejor la dinámica eruptiva pasada de los volcanes activos.

En el presente trabajo, se presentan los resultados del estudio geológico-vulcanológico del complejo volcánico Yucamane-Calientes (CVYC), cuyo objetivo es interpretar su

comportamiento geológico-vulcanológico, en base al estudio de los diversos materiales emitidos durante la historia eruptiva del volcán. De este modo, se podrá elaborar escenarios de una posible actividad futura de este volcán, con fines de prevención y mitigación de desastres.

1.1 UBICACIÓN

El complejo volcánico Yucamane-Calientes se encuentra ubicado en el extremo norte del departamento de Tacna, en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes del sur peruano (Figura 1.2). Políticamente se encuentra en la provincia de Candarave (Tacna), en las siguientes coordenadas geográficas:

Latitud 17° 08' 34" – 17° 12' 50" S

Longitud 70° 14' 50" – 70° 09' 55" O

Con coordenadas UTM

N: 8104224.4, E: 367333.9 WGS 84 - Zona 19 Sur

N: 8096410.4, E: 376098.5 WGS 84 - Zona 19 Sur

El complejo volcánico se localiza sobre una altiplanicie volcánica en cuyos extremos, oriental y occidental, se localizan dos valles amplios y profundos de origen glaciar, denominados Calientes y Callazas, respectivamente. El volcán Yucamane cubre un área de 45 km² y su volumen alcanza 26 km³, aproximadamente.

El complejo volcánico se ha edificado al sur de un estratovolcán extinto y erosionado de edad Mio-Pliocena, denominado Yucamane Chico (5025 m s. n. m.). El volcán Calientes (4980 m s. n. m.) está construido al extremo norte del complejo, colindante con el Yucamane Chico, mientras que el volcán Yucamane (5495 m s. n. m.) está localizado al sur. El Yucamane está constituido por un estratocono en cuya cima se encuentra el cráter activo albergado dentro de otro cráter más antiguo. La morfología relativamente poco erosionada del complejo y de sus depósitos, corroborada con las edades radiométricas ⁴⁰K/⁴⁰Ar y C¹⁴ obtenidas en este trabajo, sugiere un emplazamiento en una etapa muy reciente (Pleistoceno superior al Holoceno).

1.2 VÍAS DE ACCESO

Se puede acceder al área de estudio desde las ciudades de Tacna y Moquegua, siguiendo cualquiera de las siguientes rutas principales:

- Desde la ciudad de Moquegua, se accede por medio de la carretera binacional asfaltada Moquegua-Desaguadero. Por esta vía, en la zona de la altiplanicie, específicamente en el sector de Huaytire, se toma una carretera afirmada en dirección sur, hacia el pueblo de Candarave. Aproximadamente, en el kilómetro 40 de dicha vía, existe un desvío hacia el este, por donde se accede hacia el sector

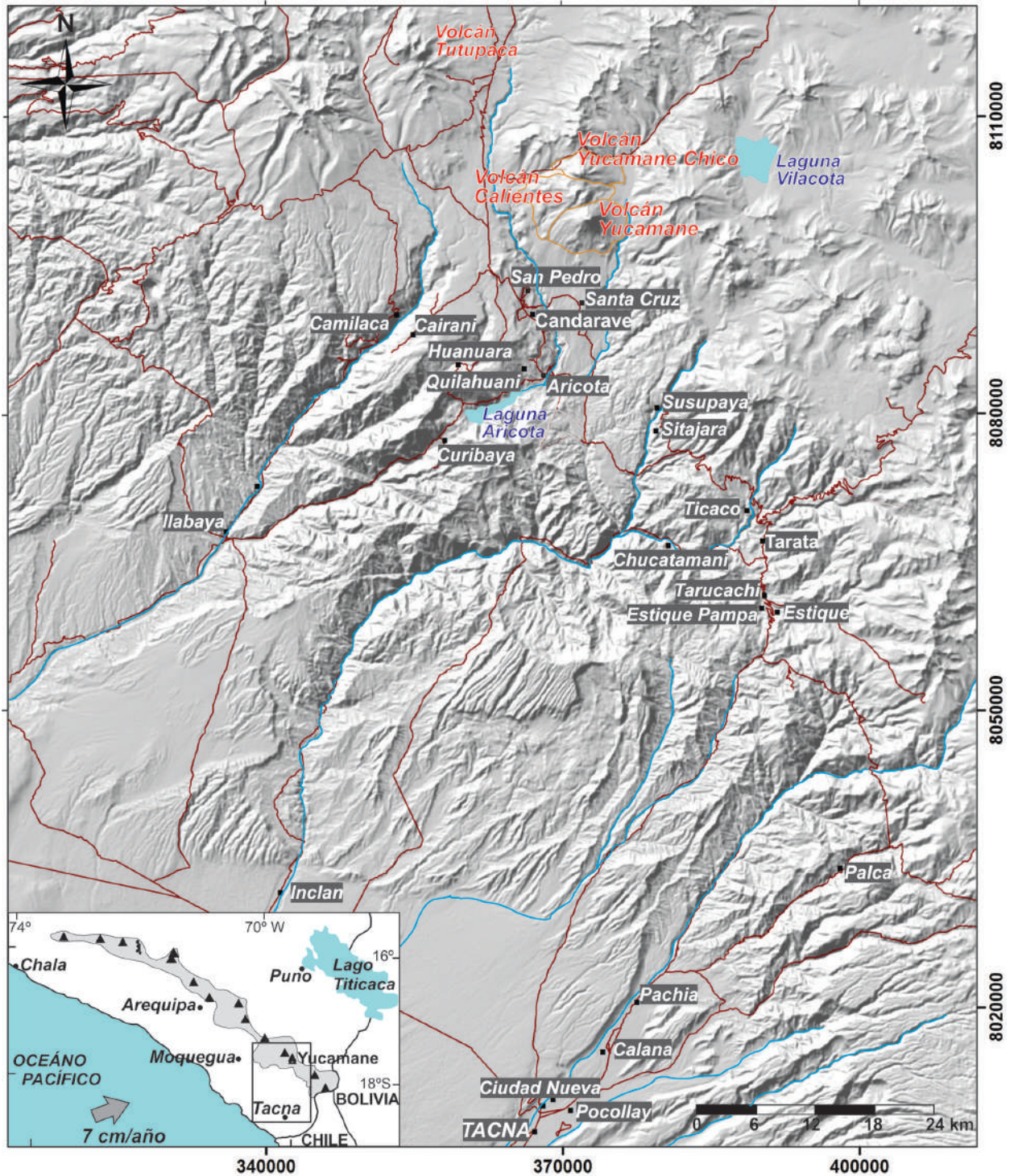


Figura 1.2 Mapa de ubicación del complejo volcánico Yucamane-Calientes. En la parte inferior, se presenta el mapa del sur peruano con la cadena volcánica y los volcanes activos y potencialmente activos existentes en dicha zona.

oeste y norte del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Este último tramo corresponde a una trocha difícil de transitar con vehículos ligeros, dado que carece de mantenimiento.

- Por la carretera Panamericana sur, a la altura del poblado de Tomasiri (Tacna), se accede al este por medio de una carretera asfaltada hacia la zona de Pampa Gallinazos y de ahí a la localidad de Ticapampa (valle del río Ilabaya). Desde esta zona, se accede por medio de una carretera afirmada a las localidades de Curibaya, Aricota y Candarave. Desde Aricota, se puede acceder hacia los poblados de Jirata y Santa Cruz, desde donde se accede hacia los sectores sur y sureste del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Asimismo, desde el poblado de Candarave, se puede acceder hacia el poblado de Yucamane pampa, desde donde se accede a los sectores sur, SE y SO del volcán Yucamane.
- Desde la ciudad de Tacna, se accede a la localidad de Tarata por medio de una carretera asfaltada, luego se prosigue a la ciudad de Candarave, a través de la carretera afirmada Tarata-Aricota-Candarave (actualmente en proceso de asfaltado). Por esta misma carretera, en las inmediaciones del poblado de Jirata, se puede acceder a los poblados de Pueblo Libre y Santa Cruz. Desde la localidad de Santa Cruz, se accede al flanco sur, SE, este y NE del complejo volcánico Yucamane-Calientes, esto a través de la carretera Santa Cruz-Calientes.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El presente estudio tiene los siguientes objetivos principales:

1. Efectuar el cartografiado geológico-volcanológico (escala 1/25 000) del complejo volcánico Yucamane-Calientes y sus alrededores, para poder establecer la distribución, el área de emplazamiento y el modo de emplazamiento de los productos volcánicos.
2. Efectuar un estudio estratigráfico para determinar el tipo de actividad eruptiva pasada del complejo volcánico Yucamane-Calientes, con énfasis en los tipos de dinamismos eruptivos y el alcance de los depósitos emitidos por dicho complejo, y la magnitud de las principales erupciones del mismo.
3. Determinar las edades relativas de emplazamiento de los depósitos e inferir la frecuencia eruptiva de los principales eventos volcánicos, así como la evolución global del sistema volcánico, mediante dataciones radiométricas ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ y C^{14}) y correlaciones estratigráficas.
4. Estudiar la petrografía y mineralogía de los productos volcánicos para inferir la evolución magmática y determinar su influencia en los tipos de mecanismos eruptivos ocurridos durante la historia del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

5. Mostrar el tipo de comportamiento geoquímico en los magmas emitidos por los volcanes Calientes y Yucamane a través del tiempo, y explicar si corresponden a una misma serie magmática, lo que ayudará a comprender el modo de evolución del complejo volcánico.
6. Determinar la procedencia y la evolución de los magmas, así como el comportamiento del sistema magmático a través del tiempo, mediante estudios petrológicos y geoquímicos.
7. Evaluar los tipos de peligros volcánicos que presenta el complejo volcánico en caso de una futura erupción.
8. Elaborar mapas de peligros volcánicos que muestren las áreas más vulnerables frente a futuras erupciones de los volcanes que constituyen este complejo (Calientes y Yucamane). Estos mapas son importantes en el ordenamiento y planificación del territorio, así como en la gestión de una crisis volcánica.
9. Con este estudio, además de otras variables naturales, será posible efectuar una adecuada planificación del uso de la tierra, ubicación y proyección de obras civiles (carreteras, puentes, etc.), para mitigar los efectos de una futura erupción.

1.4 METODOLOGÍA

La metodología empleada para el presente trabajo consistió en lo siguiente:

Trabajos de gabinete I

- Recopilación de material bibliográfico relacionado a la geología, geomorfología, petrología, geoquímica, etc., disponible en tesis universitarias, boletines y revistas científicas, consideradas de interés para la elaboración del presente trabajo.
- Procesamiento e interpretación de imágenes de satélite Aster en combinación de las bandas 9,3,1, para cartografiar los productos volcánicos; delimitar el área de emplazamiento de los depósitos volcánicos; cartografiar tipos de estructuras volcánicas existentes; definir la geometría y distribución de estructuras tectónicas como fracturas, fallas y/o lineamientos presentes en la zona donde se localiza el complejo volcánico Yucamane-Calientes.
- Fotointerpretación geológica mediante el uso de fotografías aéreas a escala 1:42000 pertenecientes al Servicio Aerofotográfico Nacional, que corresponden al año 1955; con este material se elaboró inicialmente un mapa geológico base.
- Adquisición de un plano topográfico de Tarata a escala 1:25 000, perteneciente al Programa Especial de Titulación

de Tierras (PETT), del Ministerio de Agricultura, el cual sirvió como plano base para sobreponer los datos de la fotointerpretación geológica y los datos del cartografiado geológico y estructural.

- Se elaboró un Modelo Digital de Elevación (DEM) con curvas de nivel cada 25 m, esto a partir del mapa topográfico del PETT, a escala 1:25 000. Dicho DEM se elaboró con el software Global Mapper 10, para luego ser usado en la elaboración de los mapas de peligro y geológico, así como en el modelamiento de procesos volcánicos (por ejemplo con el software LaharZ, Schilling, 1998).
- Para el procesamiento de imágenes satelitales, así como también para la digitalización de mapas tanto geológico, geomorfológico y estructural, elaborado en el presente estudio, se utilizaron los programas de Arcgis 9.3 y ENVI 4.5.

Trabajos de campo

Estos trabajos se realizaron entre los años 2012 al 2015.

Salidas de campo en el año 2012

Durante este año se realizaron los siguientes trabajos:

- Reconocimiento geológico y cartografiado a escala 1:25 000, de estructuras y depósitos volcánicos que afloran en los flancos oeste, noroeste y sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes.
- Estudio tefroestratigráfico de los productos de caídas y flujos piroclásticos que afloran al sur y SE del volcán Yucamane (inmediaciones de los poblados Yucamane pampa, Patapatani, Santa Cruz y Calientes), con el objeto de determinar la secuencia estratigráfica, la edad relativa, el comportamiento eruptivo y la distancia hasta donde se desplazaron las tefras emitidas por los volcanes Yucamane y Calientes.
- Muestreo de las diversas lavas y depósitos piroclásticos, asociados a la actividad de los volcanes Yucamane y Calientes, con el objeto de realizar estudios petrológicos, geoquímicos y dataciones radiométricas.

Salidas de campo en el año 2013

Durante ese año se realizaron los siguientes trabajos:

- Muestreo y cartografiado geológico de los diversos depósitos de flujos piroclásticos, flujos de lava, flujos de lodo y escombros y depósitos de avalancha de escombros que afloran en la parte baja del flanco sur del volcán Yucamane. Posteriormente, se prosiguió con el cartografiado geológico y la toma de muestras de los sectores S, SE y N de dicho volcán.

- Se continuó con el cartografiado geológico y la toma de muestras de depósitos volcánicos de los flancos oeste, NE y E (4600 a 4800 m s. n. m.) del volcán Calientes.
- Se prosiguió con el estudio estratigráfico en las quebradas Honda y Campanani (flanco sur del volcán Yucamane), donde afloran depósitos emitidos por el volcán Yucamane, entre los que se distinguen: flujos de barro, flujos piroclásticos y caídas de tefras.
- Asimismo, se realizó la evaluación de la vulnerabilidad ante erupciones volcánicas: localización y evaluación de las características de los centros poblados aledaños al volcán Yucamane, tipos de construcciones, obras de infraestructura existentes, terrenos de cultivos, etc.
- Se prosiguió con el cartografiado geológico de fallas y estructuras geológicas que existen en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Además, se continuó con el estudio tefroestratigráfico de depósitos que afloran al pie del sector SE y E del volcán Yucamane, producidos durante erupciones históricas y holocénicas.

Salidas de campo en el año 2014

En dicho año se efectuaron los siguientes trabajos de campo:

- Se prosiguió con el cartografiado geológico y la toma de muestras de lavas que afloran en los flancos O, SE, SO y E (entre 4000 y 4600 m s. n. m.) del volcán Yucamane.
- Se prosiguió con el cartografiado geológico y estudio estratigráfico de los depósitos generados por el volcán Yucamane Chico, entre los que se distinguen los flujos de lavas que afloran al NO y NE del complejo Yucamane-Calientes.
- Se realizó el estudio tefroestratigráfico detallado de los productos emitidos por la erupción subpliniana del volcán Yucamane ocurrida hace 3270 años AP.
- Se continuó con el estudio estratigráfico de los flujos de lavas, depósitos de caída y flujos piroclásticos que afloran al NO y NE del complejo Yucamane-Calientes.
- Se prosiguió con el cartografiado geológico de fallas y estructuras geológicas que existen en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes.
- Se continuó con el muestreo de las diversas lavas y depósitos piroclásticos emitidos por los volcanes Yucamane y Calientes, con el objeto de realizar estudios petrológicos, geoquímicos y dataciones radiométricas.

Trabajos de gabinete II

Durante los años 2012, 2013 y 2014, de manera paralela a los trabajos de campo, se realizaron los siguientes trabajos de gabinete:

- Se elaboró una base de datos de las muestras tomadas en el trabajo de campo que contiene el código de muestras, la ubicación con coordenadas en proyección UTM/WGS84/ zona 19S, cota, descripción petrográfica de la muestra y resultados de análisis químicos.
- Periódicamente, se envió las muestras de campo recolectadas a la Dra. Celine Liorzou del Laboratorio "Dominios Oceánicos", de la Universidad de Bretaña Occidental (Brest, Francia), para los respectivos análisis químicos de elementos mayores y trazas.
- Igualmente, se procedió al envío de los productos volcánicos del complejo Yucamane-Calientes al Laboratorio de Petromineralogía del INGEMMET, para la confección de secciones delgadas.
- En el año 2013, se realizó el envío de 12 muestras de rocas al Dr. François Nauret del Laboratorio Magmas y Volcanes (Clermont-Ferrand, Francia), para realizar análisis isotópicos (Sr, Nd) de dichas muestras.
- En el año 2014, se realizó la revisión y culminación del mapa geológico a escala 1: 25 000 del complejo Yucamane-Calientes, en base a la reinterpretación de las imágenes satelitales Aster, Google Earth y fotografías aéreas.
- Entre los años 2014 y 2015, se realizó la revisión, evaluación e interpretación de toda la información geológica, petrológica y geoquímica, obtenida durante la etapa de gabinete y del trabajo de campo.
- Redacción de Boletín

1.5 ESTUDIOS ANTERIORES EN EL ÁREA DE TRABAJO

Sobre la geología del complejo volcánico Yucamane-Calientes o geología del área donde se localiza dicho complejo volcánico, existen pocos trabajos. A continuación, se cita a los autores que estudiaron la zona.

Jaén H. (1965) realizó el mapa geológico del cuadrángulo de Tarata (Hoja 35-v), a escala 1:100 000, publicado por el Servicio de Geología y Minería del Perú, en el Boletín N° 11, Serie A. En dicho mapa, este autor asignó a las rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes como Grupo Barroso. Asimismo, denominó como parte de la Formación Capillune (Mioceno) a la secuencia de flujos piroclásticos de pómez y ceniza «Basal» proveniente de una erupción explosiva paroxismal del volcán Calientes, datada en aproximadamente 540 ka, a la cual la denominó como parte de la Formación Capillune (Mioceno). Actualmente, el conocimiento de la geología y estratigrafía volcánica de la zona muestran que la asignación de dichos depósitos como Fm. Capillune está errada.

Morche W. & De la Cruz N. (1994) realizaron un reconocimiento geológico breve del volcán Yucamane y el estudio petrográfico de los productos emitidos por dicho volcán. Este trabajo fue publicado en forma de resumen extendido en el VIII Congreso Peruano de Geología, en 1994, organizado por la Sociedad Geológica del Perú.

INGEMMET & ELECTROPERÚ (1994) realizaron de manera conjunta un estudio geológico de la zona de los volcanes Tutupaca y Yucamane, a fin de evaluar el potencial geotérmico en la zona, para una eventual explotación de dichos recursos. En este estudio se analiza de manera breve y poco detallada la geología y estratigrafía del área donde se localizan los volcanes Tutupaca y Yucamane.

De la Cruz N. & De la Cruz O. (2000) realizaron la actualización del mapa geológico del Cuadrángulo de Tarata, a escala 1:50 000, donde se localiza el complejo volcánico Yucamane-Calientes. Los autores asignaron erróneamente algunas secuencias volcánicas como asociadas a erupciones pasadas del volcán Yucamane. Asimismo, no lograron diferenciar bien algunas secuencias volcánicas, como por ejemplo, cartografiaron unos depósitos de avalanchas de escombros como flujos de lavas traquiandesíticas en inmediaciones del poblado de Santa Cruz, localizados al sur del volcán Yucamane.

Fidel L. & Huamaní A. (2001) realizaron un estudio denominado **Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Yucamane**, publicado en el Boletín N° 26, Serie C-INGEMMET, donde mencionan que dicho volcán hace parte del Sistema Volcánico Yucamane y está conformado por tres conos principales: Yucamane Chico, Calientes y Yucamane, y un cono adventicio pequeño denominado Malpaso, el cual está localizado al SE del sistema volcánico. El estudio estratigráfico realizado por estos autores muestra la existencia de 21 eventos o secuencias volcánicas, emplazados en cuatro fases eruptivas variadas que ocurrieron desde el Pleistoceno superior al Cuaternario. Asimismo, realizaron una evaluación de los peligros volcánicos. Este estudio, al igual que los anteriores, también tiene inconvenientes, pues por ejemplo, no logra explicar con propiedad el tipo de actividad volcánica presentado por dicho complejo volcánico en el pasado y tampoco informa acerca de escenarios eruptivos futuros.

Cotrina G., Olarte Y., Peña F., Vargas V., Sánchez M. & Pari W. (2009) publicaron el Boletín N°2, Serie H - INGEMMET, denominado **Hidrogeología de la cuenca del río Locumba**, donde describen las características litológicas e hidrogeológicas distinguidas dentro de la cuenca del río Locumba (Tacna), cuenca donde se localiza el complejo volcánico Yucamane-Calientes. En este boletín, se presenta un inventario de fuentes de agua,

así como la zonificación de acuíferos potenciales, evaluación del grado de explotación, características hidrodinámicas, calidad de las aguas y la vulnerabilidad frente a la contaminación. Ante ello, recomendaron esquemas para su explotación y protección. En ese estudio, se menciona de manera breve la geología del volcán Yucamane.

1.6 CLIMA E HIDROLOGÍA

En este estudio se presentan datos de temperatura, precipitación, humedad relativa y radiación solar del área donde se localiza el complejo volcánico Yucamane-Calientes. Estos datos fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), institución que cuenta con una estación meteorológica convencional instalada en la provincia de Candarave, así como en los sectores de Suchez y Vizcachas. Los datos corresponden al período comprendido entre 1980 y 2007.

El factor climático varía de acuerdo a la altitud, latitud, longitud y otros factores como la cercanía de las lagunas, lagos, etc., lo que origina un contraste de climas bien diferenciados respecto a la parte superior del complejo Yucamane-Calientes (localizado entre los 4500 y 5500 m s. n. m.) y la parte inferior del volcán donde se localiza, entre los 3800-4500 m s. n. m., la altiplanicie volcánica o superficie puna.

1.6.1 Temperatura

En altitudes superiores a los 4500 a 5500 m s. n. m., donde se encuentran las laderas y las cumbres del complejo volcánico Yucamane-Calientes, predomina un clima frío. En este sector, la temperatura diurna es casi siempre inferior a 0 °C. El aire de esta región es seco y poco denso. Durante los meses de enero, febrero, marzo y junio gran parte de esta zona está prácticamente cubierta de hielo y nieve.

Entre los 3800 a 4500 m s. n. m., donde se localizan las cabeceras de los ríos Callazas y Calientes, corresponde la superficie Puna, que se caracteriza por presentar una topografía semiplana, surcada por valles glaciares, angostos y poco profundos. En esta zona, la temperatura diurna está por encima de los 5 °C; sin embargo, por las noches, casi siempre es inferior a 0 °C. En esta zona se torna difícil la vida del hombre, de los animales y de las plantas; en los meses de junio, julio y agosto, las aguas de los manantiales y riachuelos se congelan superficialmente y forman capas de hielo.

Entre los 2800 a 3800 m s. n. m., altura donde se localizan los cursos medios de los valles de los ríos Callazas y Salado, así como la zona de altiplanicie (sector de Santa Cruz) o la zona de ladera (por ejemplo, el poblado de Hualhuani), o el valle de Aricota, las temperaturas medias mensuales son de 9 a 10 °C. La temperatura máxima promedio es de 15 °C en los meses de mayo, setiembre, octubre y noviembre, mientras que la temperatura mínima media mensual es de 3.5 °C, generalmente en los meses de junio, julio y agosto (justamente, en estos meses, ocurren las heladas que afectan seriamente los cultivos). Durante los meses de diciembre a abril, se producen abundantes lluvias que consecuentemente generan o aceleran derrumbes y deslizamientos en los terrenos poco consolidados que conforman las laderas de los valles de los ríos Salado y Calientes.

1.6.2 Pluviometría

Para el análisis pluviométrico del área de estudio, se consideraron datos estadísticos de tres estaciones meteorológicas del SENAMHI, ubicadas en Candarave, Vizcachas y Suches, en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes (Tabla 1.1).

Tabla 1.1
Ubicación de estaciones pluviométricas en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes

Nombre	Coordenadas		Altitud (Msnm)	Periodo de Registro	Cuenca
	Latitud	Longitud			
Candarave	17°16'16"	70°15'	3415	1975-2006	Río Locumba
Vizcachas	17°16'41"	70°15'	4625	1965-2007	Río Locumba
Suches	16°55'	70°23'	4452	1975-2005	Río Locumba

Fuente: SENAMHI.

Las estaciones meteorológicas antes mencionadas (Tabla 1.1) registran las siguientes precipitaciones anuales: Candarave, con un promedio de 169 mm (Figura 1.3); Suches, con un promedio de 354 mm (Figura 1.4); y Vizcachas, con 180 mm (Figura 1.5). Las lluvias son estacionales y se registran en más del 90 %

durante los meses de diciembre a marzo. Durante los meses de mayo a julio, la precipitación es casi nula, lo que condiciona el régimen irregular de los ríos. En general, en áreas adyacentes al complejo volcánico Yucamane-Calientes, el promedio de precipitación anual varía entre 250 y 500 mm.

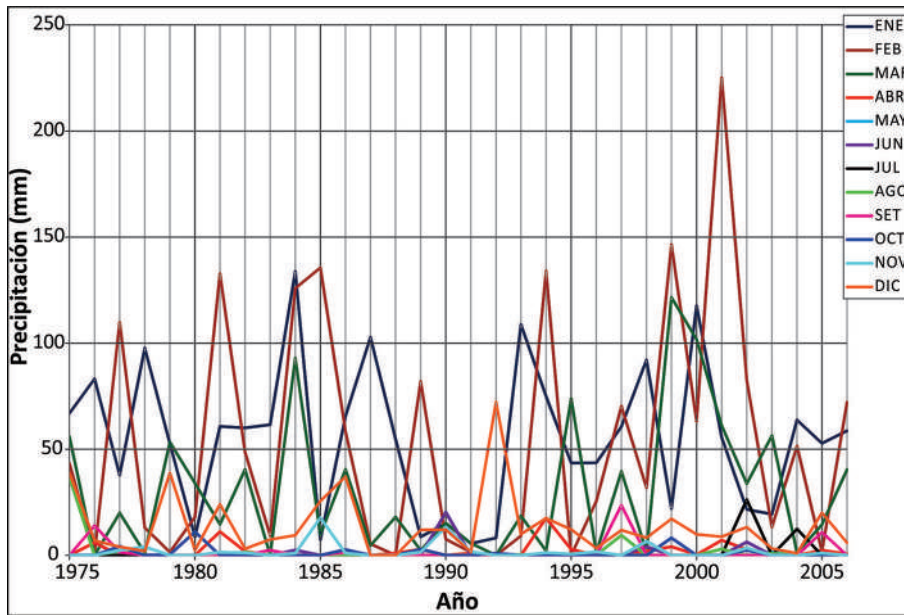


Figura 1.3 Precipitación mensual y total anual del año 1975 al 2006 registrada en la Estación de Candarave. Los meses de diciembre, enero, febrero y marzo registran mayor número de lluvias. Datos expresados en mm. Fuente: Senamhi.

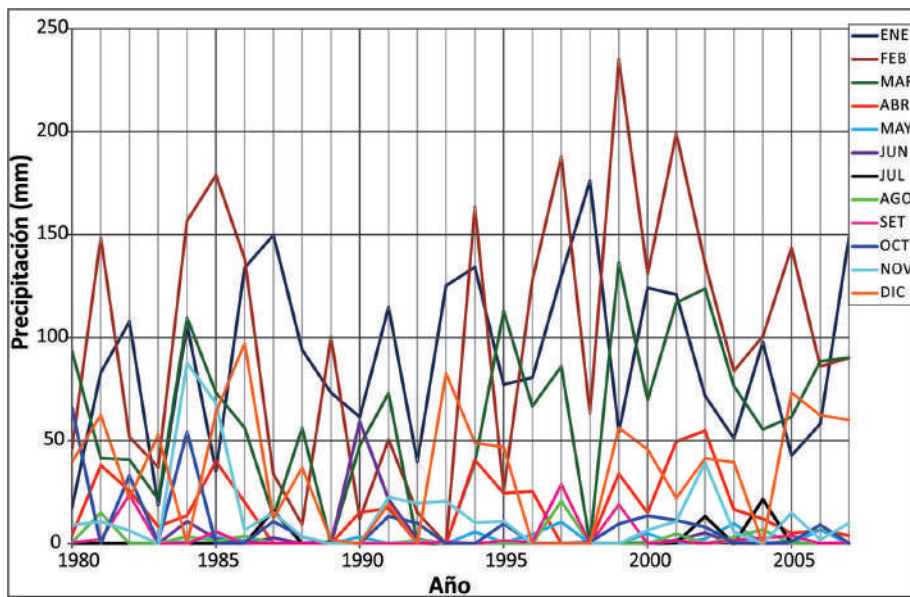


Figura 1.4 Precipitación mensual y totales anuales del año 1980 al 2007 registrados en la Estación de Suches. Los meses de enero, febrero y marzo registran mayor número de lluvias. Datos expresados en mm. Fuente: Senamhi.

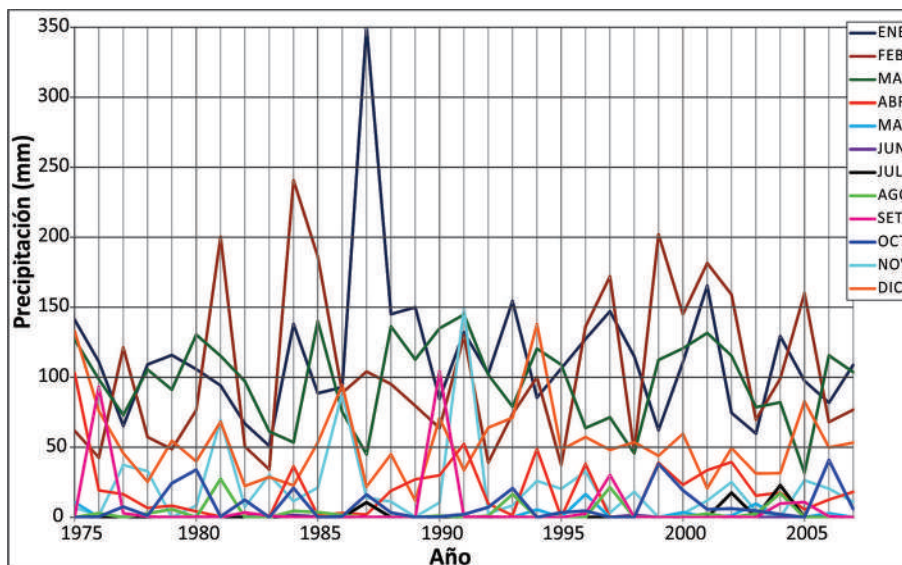


Figura 1.5 Precipitación mensual y totales anuales del año 1975 al 2007 registrados en la Estación Vizcachas. Los meses de enero, febrero y marzo presentan mayor número de lluvias. Datos expresados en mm. Fuente: Senamhi.

1.6.3 Hidrología y Drenaje

Los ríos y quebradas que se distinguen en la zona de estudio son de naturaleza irregular, relativamente torrentosos, sobre todo en épocas de lluvia, que descienden por cauces poco profundos y relativamente angostos. Todos ellos pertenecen a la cuenca del río Locumba (Figura 1.6), que tiene una longitud máxima de 149 km de recorrido, con una pendiente promedio de 3.6 %. Los cursos de agua son alimentados principalmente por las precipitaciones que caen en la parte altas de la Cordillera de los Andes y por el aporte de los deshielos de los nevados.

El complejo volcánico Yucamane-Calientes (Pleistoceno-Holoceno) y todo el conjunto de volcanes extintos del Mioceno, que se encuentran al norte de dicho complejo, separan la subcuenca del río Callazas de la subcuenca Salado-Calientes.

El río Callazas se origina en la laguna Suches, a 4470 m s. n. m., y tiene una longitud aproximada de 60 km, desde su nacimiento hasta su desembocadura en la laguna Aricota (Figura 1.6). El caudal base del río Callazas en épocas de estiaje es, principalmente, por el aporte de aguas subterráneas, a través de manantiales y manifestaciones geotermales a lo largo de su curso, y por quebradas tributarias (por ejemplo, qda. Azufre Grande, qda. Azufre Chico y otros). En inmediaciones del poblado de Aricota, este río se une con el río Jaruma y luego de 2 km de recorrido desemboca en la laguna Aricota.

El río Salado-Calientes nace al pie del Nevado Iscail Arjanco (5515 m s. n. m.). Se localiza al NE del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Inicialmente toma el nombre de río Calientes, que recibe el aporte de varios cursos de agua provenientes de los nevados, manantiales y fuentes geotermales. Hasta la cota 3500 m s. n. m. (tiene una longitud de ~8.5 km), su nombre cambia a río Salado. Luego de un recorrido de 11.4 km, toma el nombre de río Jaruma, para luego de 8.5 km, termina su recorrido en la laguna Aricota.

El drenaje está controlado por las estructuras existentes: es radial alrededor de los conos volcánicos Yucamane Chico, Calientes y Yucamane; y es subparalelo en los ríos Calientes y Salado.

1.6.4 Vientos

La dirección de los vientos varía sustancialmente en función de la altura y las estaciones. En la zona de estudio, los vientos superficiales (hasta aproximadamente los 5000 m s. n. m.) tienen una dirección predominante S-SE, cuya velocidad máxima promedio es de 20 m/s en otoño e invierno (marzo a agosto). Mientras que los vientos superficiales con dirección NNO son observados en los meses de noviembre y diciembre. Por otro lado, las direcciones de vientos a niveles de la troposfera y estratosfera (con alturas de 5000, 12 500 y 26 500 m) predominan hacia el ESE y NNO, y en forma complementaria hacia el SSE y ONO (Tabla 1.2).

Tabla 1.2
Dirección promedio de vientos en la zona de Candarave a nivel de la troposfera y base de la estratosfera

Altura (m s. n. m.)	Estaciones			
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
5000	N257°	N107°	N103°	N209°
12500	N154°	N103°	N96°	N123°
26500	N267°	N264°	N235°	N270°

Fuente: CPNTC, Instituto Geofísico del Perú (IGP), con datos del NCEP y NCAR, reanálisis 1979-1998.

1.7 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS

1.7.1 Población y vivienda

Los datos que se presentan a continuación corresponden al resultado del censo nacional (XI de población y VI de vivienda), efectuado en el año 2007 por el INEI -No se presentan los resultados del censo 2017, debido a que el INEI no ha efectuado la publicación de estos resultados a la fecha-. También se presenta la proyección en población hacia el año 2015. La mayor población se concentra hacia la parte sur del volcán Yucamane, en las provincias de Candarave y Tarata.

Candarave, situada a 9 km al SO del volcán Yucamane, es la capital de la provincia y también el pueblo más importante en

términos de población. Según los datos del censo de 2007, le siguen en importancia los distritos de Camilaca (1724 habitantes), Cairani (1355 habitantes), Quilahuani (1094 habitantes), Huanuara (823 habitantes) y Curibaya (203 habitantes). Todos estos poblados pertenecen a la provincia de Candarave. El total de la población que habita en estas localidades no ha sufrido cambio significativo durante los últimos años. En la proyección estimada para el año 2015, se puede apreciar que dicha población varía muy poco (Tabla 1.3).

Además, en la provincia de Candarave existen otros centros poblados menores, anexos y caseríos, ubicados cerca al volcán Yucamane, tales como Yucamane Pampa, San Pedro, Santa Cruz, Totorá, La Victoria, Calleraco, Morjani, Pallata, Aricota y otros.

Tabla 1.3
Total de población censada en el 2007 y proyectada al 2015, provincia de Candarave

PROVINCIA	CANDARAVE											
	CANDARAVE		CAIRANI		CAMILACA		CURIBAYA		HUANUARA		QUILAHUANI	
VARIABLE / INDICADOR	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
POBLACIÓN EN EL 2007												
Urbana	1652	52	863	64	1102	64	117	58	418	50.8	551	50.4
Rural	1522	48	492	36	622	36	86	42	405	49.2	543	49.6
POBLACIÓN PROYECTADA AL 2015	3001		1301		1515		180		898		1201	

Fuente: (INEI, 2007).

Tarata, ciudad capital de la provincia de Tarata, está localizada a 37 km al SE del volcán Yucamane. En el año 2007, dicha ciudad contaba con una población urbana de 2572 habitantes y una población rural de 1842 habitantes (INEI, 2007). Los distritos de

esta provincia que se encuentran dentro del área de influencia del volcán Yucamane son: Susupaya (848 habitantes), Sitajara (560 habitantes) y Ticaco (815 habitantes) (Tabla 1.4)

Tabla 1.4
Total de población censada en el 2007 y proyectada al 2015,
provincia de Tarata

PROVINCIA	TARATA					
	SITAJARA		SUSAPAYA		TICACO	
DISTRITO	Total	%	Total	%	Total	%
VARIABLE / INDICADOR						
POBLACIÓN 2007						
Urbana	298	53	456	54	426	52.3
Rural	262	47	392	46	389	47.7
POBLACIÓN PROYECTADA AL 2015	697		768		587	

(Fuente: INEI, 2007).

Con respecto a la cantidad de viviendas existentes en los poblados aledaños al volcán, se puede mencionar que según el censo del INEI del año 2007, en la provincia Candarave, en los distritos Candarave, Cairani, Camilaca, Curibaya, Huanuara y Quilahuani existían más de 4178 viviendas (ver tabla 1.5), las cuales en su gran mayoría son de adobe o tapia. Las demás viviendas son de ladrillo y cemento, otros de piedra y barro, así como de madera y de otros materiales. Consideramos que durante los últimos años no hubo un mayor aumento de

viviendas, pero sí una ligera renovación del tipo de construcción. Es decir, algunas viviendas de adobe o barro fueron remplazadas por material noble (cemento y ladrillo).

Según el censo del INEI del 2007, en los distritos de Sitajara, Susupaya y Ticaco (provincia Tarata), hay aproximadamente 1225 viviendas. Los tipos de viviendas en estos distritos son principalmente de adobe o tapia (Tabla 1.6). Es necesario resaltar que los pobladores de la zona alto andina (provincia de Tarata) son los que tienen menos artefactos electrodomésticos respecto a los pobladores de la costa o de los valles de la costa.

Tabla 1.5
Características de las viviendas ubicadas dentro del área de influencia del volcán Yucamane, de los distritos de la provincia de Candarave

PROVINCIA	CANDARAVE											
	DISTRITO		CAIRANI		CAMILACA		CURIBAYA		HUANUARA		QUILAHUANI	
VARIABLE / INDICADOR	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
VIVIENDA												
Viviendas particulares censadas	1591		585		1120		132		318		432	
Material predominante en paredes												
Paredes de ladrillo o bloque de cemento	198	18.7	34	7.6	57	9.3	6	9.1	36	12.8	75	21.7
Paredes de adobe o tapia	762	72	327	73	523	85	53	80	194	69	212	61.3
Paredes de madera	5	0.5	2	0.4	1	0.2	4	6.1	2	0.7	16	4.6
Paredes de quincha	1	0.1	4	0.9	1	0.2	1	1.5	22	7.8	1	0.3
Paredes de estera	2	0.2	1	0.2	1	0.2			6	2.1	4	1.2
Paredes de piedra con barro	89	8.4	76	17	29	4.7	1	1.5	15	5.3	21	6.1
Otro	1	0.1	2	0.4	1	0.2	1	1.5	3	1.1	17	4.9
HOGAR												
Equipamiento												
Dispone de radio	2161	74.9	344	75	461	74	58	84	218	73	264	75
Dispone de televisor a color	935	32.4	77	17	248	40	44	64	99	33	75	21.3
Dispone de equipo de sonido	208	7.2	15	3.3	50	8	20	29	25	8.4	11	3.1
Dispone de lavadora de ropa	7	0.2	1	0.2								
Dispone de refrigeradora o congeladora	54	1.9	6	1.3	5	0.8	18	26	3	1	1	0.3
Dispone de computadora	17	0.6	4	0.9	2	0.3			1	0.3		
Dispone de tres o más artefactos y equipos	189	6.6	13	2.8	44	7.1	21	30	20	6.7	6	1.7
Servicio de información y comunicación												
Dispone de servicio de teléfono fijo	42	1.5			2	0.3					1	0.3
Dispone de servicio de telefonía celular	308	10.7	6	1.3	37	5.9			2	0.7	10	2.8
Dispone de servicio de conexión a Internet	1	0										
Dispone de servicio de TV por cable	5	0.2			1	0.2	1	1.4				

(Fuente: INEI, 2007)

Tabla 1.6
Características de las viviendas ubicadas dentro del área de influencia del volcán Yucamane,
de los distritos de la provincia de Tarata

PROVINCIA	TARATA					
DISTRITO	SITAJARA		SUSAPAYA		TICACO	
VARIABLE / INDICADOR	Total	%	Total	%	Total	%
VIVIENDA						
Viviendas particulares censada	288		525		412	
Material predominante en paredes						
Paredes de ladrillo o bloque de cemento	19	8.5	21	6.4	18	5.5
Paredes de adobe o tapia	203	91	292	90	289	88.4
Paredes de madera						
Paredes de quincha	1	0.4				
Paredes de estera						
Paredes de piedra con barro			13	4	19	5.8
Otro					1	0.3
HOGAR						
Equipamiento						
Dispone de radio	166	70	251	75	228	68.7
Dispone de televisor a color	61	26	69	21	77	23.2
Dispone de equipo de sonido	10	4.2	20	6	23	6.9
Dispone de lavadora de ropa	2	0.8			1	0.3
Dispone de refrigeradora o congeladora	1	0.4			2	0.6
Dispone de computadora					1	0.3
Dispone de tres o más artefactos y equipos		3.8	17	5.1	15	4.5
Servicio de información y comunicación						
Dispone de servicio de teléfono fijo		0.8			2	0.6
Dispone de servicio de telefonía celular	2	0.8	4	1.2	40	12

(Fuente: INEI, 2007)

1.7.2 Actividades económicas principales

La principal actividad económica que se desarrolla en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes es la agricultura y en menor medida la crianza de animales vacunos y camélidos. Esta última actividad, principalmente, se desarrolla con mayor énfasis en la zona del altiplano, por encima de los 4000 m s. n. m. También una parte de la población de las provincias de Candarave y Ticaco realiza trabajos rutinarios de construcción civil. Asimismo, otra parte labora en empresas mineras o entidades del estado, tales como colegios, escuelas, municipalidades, postas médicas, comisarías, Ministerio de Agricultura, Banco de la Nación, etc. Otra actividad desarrollada y que merece ser incentivada es el turismo, dado que la zona alberga impresionantes paisajes naturales, así como una flora y fauna diversa.

1.7.2.1 Actividad agrícola

En cuanto a la producción agrícola, existen cuatro subcuencas localizadas alrededor del complejo volcánico Yucamane-Calientes:

- Las subcuencas Callazas-Salado que están localizadas en los extremos occidental y oriental, respectivamente, del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Estas subcuencas son las de mayor superficie agrícola, destinadas principalmente al cultivo de la alfalfa. Además, se cultiva cebada, maíz amiláceo, trigo, ajo, cebolla, papa, entre otras especies.
- Las subcuencas Tacalaya-Cairani son las segundas en importancia y las que poseen mayor superficie con cultivos transitorios, como es el caso del orégano.
- Las subcuencas Tarucachi-Estique y la microcuenca del Yabroco están principalmente orientadas a los cultivos transitorios; entre los más importantes se encuentran el orégano, la papa y los cereales. En la microcuenca del Yabroco, los cultivos frutícolas ocupan una superficie importante.
- Las subcuencas Tarata-Ticaco (al SE del volcán Yucamane) producen maíz amiláceo, ajo, papa y cebada.

1.7.2.2 Actividad ganadera

En los alrededores del volcán Yucamane, sobre todo al pie del flanco sur, se realizan labores de pastoreo intensivo de ganado vacuno, ovino y porcino, con un promedio de 20 a 60 cabezas de ganado por familia, dependiendo del área de pastos que dispongan.

Adicionalmente, en el altiplano, se realiza el pastoreo de ganado camélido (alpacas y llamas), donde la cantidad de cabezas por familia superan algunos cientos.

La fibra y la carne de los camélidos son los productos que al ser trocados o comercializados permiten a los pobladores de la zona alto andina obtener productos agrícolas de los valles y productos manufacturados industrializados.

Las áreas pertenecientes al departamento de Puno, ubicadas al NE del volcán Yucamane, por encontrarse sobre los 4500 m s. n.m., son poco o nada habitadas y constituyen pequeños caseríos o estancias donde la escasa población se dedica principalmente al pastoreo de camélidos.

1.7.2.3 Actividad minera

En el área de influencia del volcán Yucamane, se desarrolla una actividad minera principalmente dedicada a la explotación de cobre. Es necesario mencionar que desde el siglo XVIII se tenía conocimiento de los depósitos de este metal, y es recién a mediados del siglo XX cuando se empezaron a desarrollar los grandes yacimientos como Toquepala y Cuajone, localizados a 45 y 36 km, respectivamente, del complejo volcánico Yucamane-Calientes. La empresa responsable de la explotación de dichos yacimientos es Southern Cooper Corporation, que posee la mayor producción de cobre a nivel nacional, gracias a las mencionadas unidades productoras. La extracción del mineral es a tajo abierto.

Toquepala está ubicada en el distrito de Ilabaya (región Tacna), aproximadamente a 45 km al oeste del volcán Yucamane. La explotación de la mina Toquepala se destaca por la producción de cobre blíster, así como de molibdeno, plata y oro. Durante el año 2012, la producción de Cu ascendió a los 264 794 libras. Las estaciones de bombeo ubicadas en la laguna Suches son parte de dicha mina.

Cuajone está ubicada en el distrito de Torata (región Moquegua) y se encuentra a 36 km al oeste del volcán Yucamane. La explotación de esta mina también se destaca por la producción de Cu. Durante el año 2012, su producción ascendió a 350 000 libras de Cu. Esta mina cuenta con aproximadamente 1272 empleados.

Campamento Suches está ubicado en el sector Huaytire (región Tacna), a 40 km al NO del Yucamane. Este campamento perteneciente a la empresa minera Southern Cooper Corporation se encarga de abastecer de agua a las minas de Cuajone y Toquepala para sus operaciones mineras.

Quellaveco es un proyecto minero ubicado en la región Moquegua, a 50 km al oeste del volcán Yucamane. Este proyecto pertenece a la compañía minera Anglo-American y actualmente se encuentra en proceso de implementación. Tenía previsto empezar sus operaciones en el año 2015. Actualmente tiene una reserva de 680 millones de toneladas métricas de cobre.

Central hidroeléctrica Aricota I: Esta central hidroeléctrica se encuentra ubicada en el distrito Curibaya, provincia Candarave, aguas abajo de la laguna Aricota, a 40 km del volcán Yucamane. Cuenta con una potencia instalada de 23.8 MW y está puesta en servicio desde el año 1967 (GRM, 2012).

Central hidroeléctrica Aricota II: Esta hidroeléctrica se encuentra ubicada en el distrito Curibaya, provincia Candarave, a 44 km del Yucamane, aguas abajo de la laguna Aricota. Cuenta con una potencia instalada de 11.9 MW y está puesta en servicio desde el año 1966 (GRM, 2012).

1.7.2.4 Turismo y otros

En lo referente al turismo, en la provincia Candarave, el flujo de turismo regional y nacional ha experimentado un ligero crecimiento en los últimos 10 años (Strobach, 2009). Se ha logrado ampliar la planta hotelera y mejorado sus estándares

de calidad y cuenta a la fecha con capacidad para recibir mayor afluencia de turistas (Figura 1.7).

La zona de Candarave es considerada como un importante destino turístico en el sur del Perú. Esta zona, localizada en la parte alto andina de Tacna, es un paisaje hermoso y cuenta con una amplia biodiversidad: flora y fauna (Strobach, 2009). Entre la fauna silvestre destacan el cóndor, así como los camélidos domésticos y silvestres; mientras que en la flora destacan los queñuales, los yaretales y otros. Asimismo, se puede efectuar turismo de aventura como el canotaje, andinismo, caminatas, escalada en roca, bicicleta de montaña, entre otros.

Por otro lado, en las inmediaciones del volcán Yucamane, se encuentra la fuente geotermal Calientes (Figura 1.8), que representa un importante prospecto de energía geotérmica de los Andes del sur peruano. Se localiza en una zona plana, dentro de un valle glaciar, a 6 km de distancia al noreste del volcán Yucamane. Esta zona tiene más de 4 km de distancia; allí se localizan pozas y géiseres de agua, cuyas temperaturas alcanzan los 50 °C. En esta zona, la Municipalidad Distrital de Candarave logró construir unos pequeños baños termales que merecen ser implementados y mejorados, para permitir una mayor cantidad de turistas nacionales e internacionales.

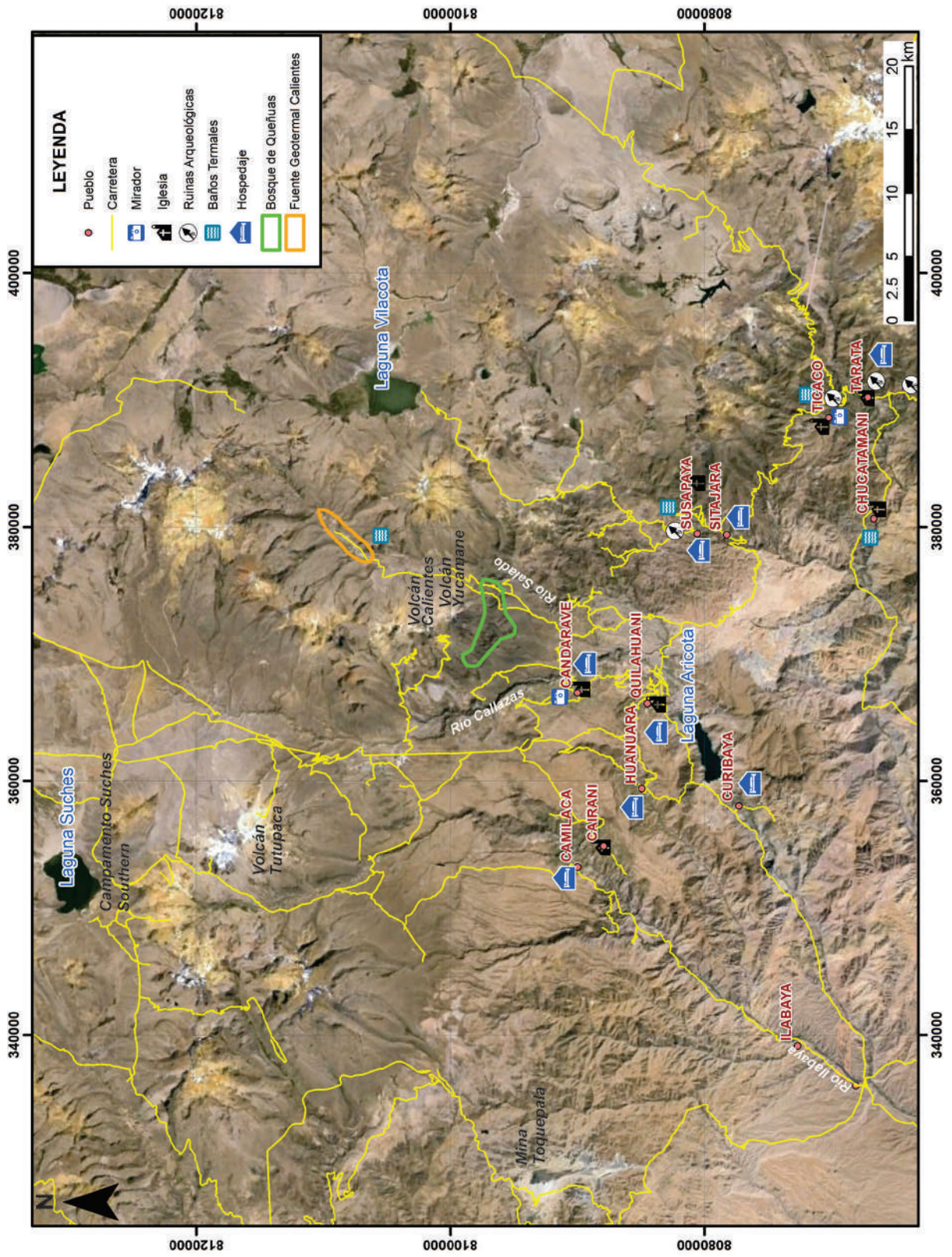


Figura 1.7 Mapa de rutas turísticas localizadas alrededor del complejo volcánico Yucamane-Calientes



Figura 1.8 Fuente termal de Calientes, ubicada al NE del complejo volcánico Yucamane-Caliente.

CAPÍTULO II

GEOMORFOLOGÍA

El complejo volcánico Yucamane-Calientes está constituido por dos edificios volcánicos: Calientes y Yucamane, alineados de norte a sur, y edificados sobre una altiplanicie volcánica localizada entre los 4200 y 4500 m s. n. m. Estos estratoconos yacen al extremo sur del antiguo volcán Yucamane Chico, que es un volcán parcialmente destruido, alterado e hidrotermalizado. Los principales procesos que influyeron en la morfología actual de dicho complejo volcánico pueden ser agrupados de la siguiente manera:

- Actividad volcánica (erupciones, crecimiento de domos, etc.), que se prolonga desde el Pleistoceno hasta el Holoceno.
- Glaciaciones, especialmente las ocurridas durante el Pleistoceno tardío y Holoceno.
- Características y propiedades físico-químicas de las rocas que conforman los volcanes Yucamane-Calientes.
- Actividad de fallas geológicas en la zona del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

Para una mejor descripción, las unidades geomorfológicas han sido agrupadas en tres grandes grupos:

2.1 GEOFORMAS DE ORIGEN VOLCÁNICO

El complejo volcánico Yucamane-Calientes está compuesto por dos estratovolcanes orientados en dirección norte-sur (Figura 2.1), que en total tienen 11 km de largo y que cubren un área de ~53 km². Uno de los edificios es el volcán Calientes, que está localizado al norte. Este edificio alberga, en su extremo sureste, un complejo de domos, mientras que el otro edificio corresponde al volcán Yucamane, el cual tiene forma cónica y que está ubicado al sur del complejo. A continuación se describen las características de las geoformas de origen volcánico:

2.1.1 Flujos de lavas de volcanes del Mioceno (Mi-la)

Corresponden a lavas andesíticas y dacíticas bastante erosionadas, y a veces alteradas e hidrotermalizadas que yacen en inmediaciones de los volcanes Estrone (SO del Yucamane), López Estraña (este del Yucamane), Nazaparco (NO del

Yucamane) y San Pedro (norte del Yucamane Chico). También se considera en esta unidad a los flujos de lava que afloran al pie del flanco sur del volcán Yucamane y que forman el substrato del mismo. En general, las lavas de los centros volcánicos presentan superficies desgastadas que a veces forman relieves de pendiente suave a pronunciada (10° a 40° de inclinación). Estas lavas son las más antiguas y se encuentran en el área de estudio. Fueron emplazadas antes que el complejo volcánico Yucamane-Calientes.

2.1.2 Colinas de ignimbritas del Mioceno (Mi-ig)

Corresponden a una secuencia estratificada de depósitos de flujos de pómez y ceniza riolítica, soldados y consolidados que ocupan una extensa área al sureste del volcán Yucamane (Figura 2.1), como aquellas observadas en la margen izquierda del río Salado, así como en inmediaciones de la zona Huajtavira y al Este del poblado Calleraco. Estos depósitos se caracterizan por presentar superficies ligeramente onduladas, que forman promontorios resistentes y poco elevados. A la vez, estos depósitos de flujos son disectados por ríos y quebradas amplias y poco profundas.

2.1.3 Flujos de lavas del Yucamane Chico (La-Yu)

Corresponden a flujos de lavas que tienen una base masiva y un tope que contiene bloques muy angulosos. Conforman relieves de baja a alta pendiente, entre 5° a 45° (Figuras 2.2 y 2.3). Desde luego, las lavas que forman relieves de baja pendiente están localizadas en la parte inferior del volcán, visibles en los extremos oeste y este del mismo, mientras que las lavas de fuerte pendiente están localizadas en la cima del volcán. Las lavas del Yucamane Chico fueron emitidas posiblemente durante el Mioceno, ya que se vieron intensamente afectadas por la actividad glacial registrada durante el Pleistoceno-Holoceno.

El estratocono Yucamane Chico es un volcán constituido por rocas andesíticas alteradas y parcialmente hidrotermalizadas, destruido en su sector sur. Este último posiblemente corresponde al borde de una caldera, cuyo centro estaría debajo del volcán Calientes. El Yucamane Chico posee forma cónica asimétrica,

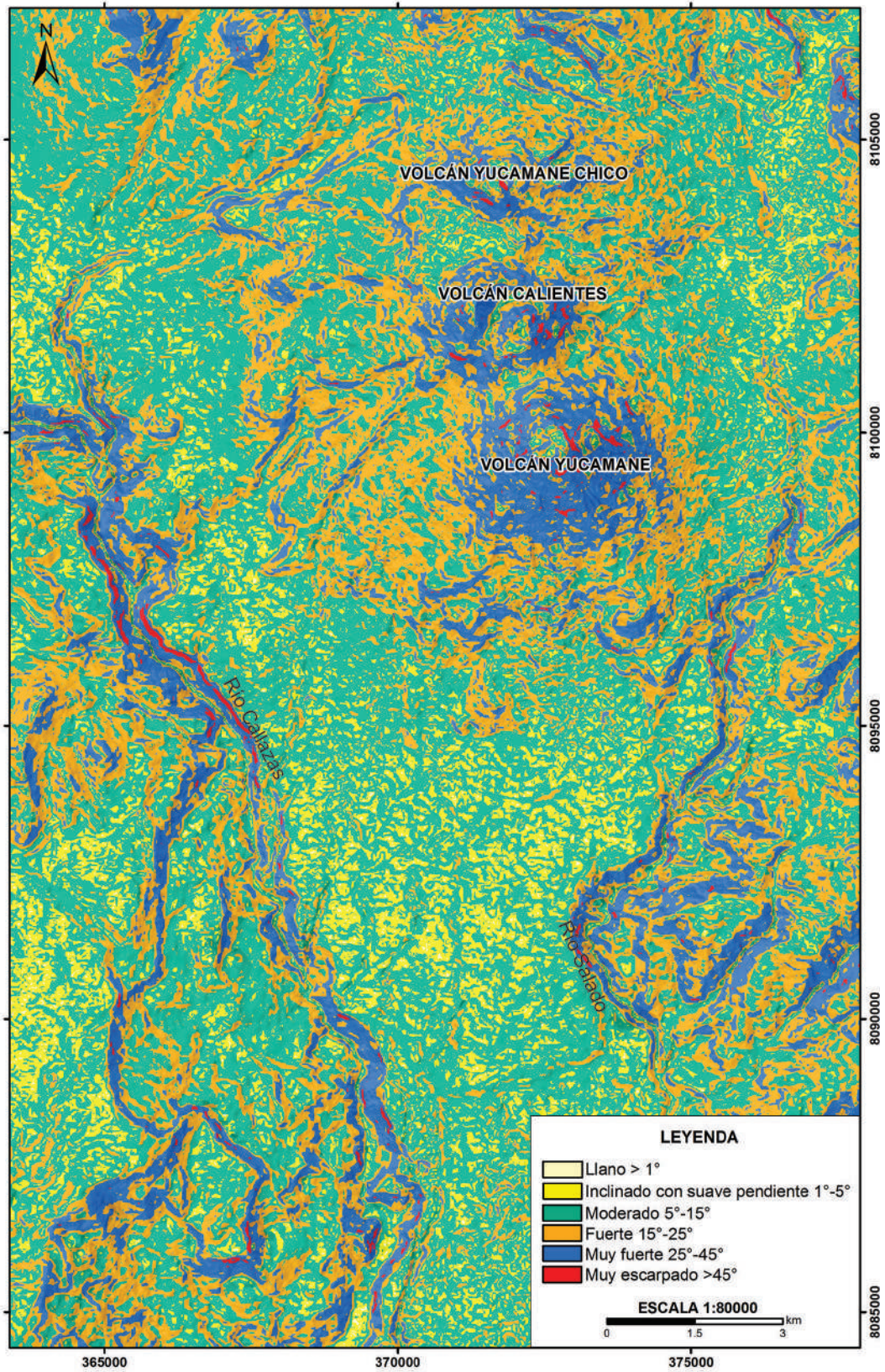


Figura 2.2 Mapa de pendientes del complejo volcánico Yucamane-Calientes

elongada de NO a SE (Figura 2.3), cuya longitud máxima es de ~4.8 km y cuyo ancho es de ~2.4 km. Se ha desarrollado entre los 4300 y 5025 m s. n. m. Su flanco sur tiene pendiente

casi vertical, mientras los extremos oriental y occidental tienen pendientes menos pronunciadas, entre 15° a 35° de inclinación (Figura 2.2).

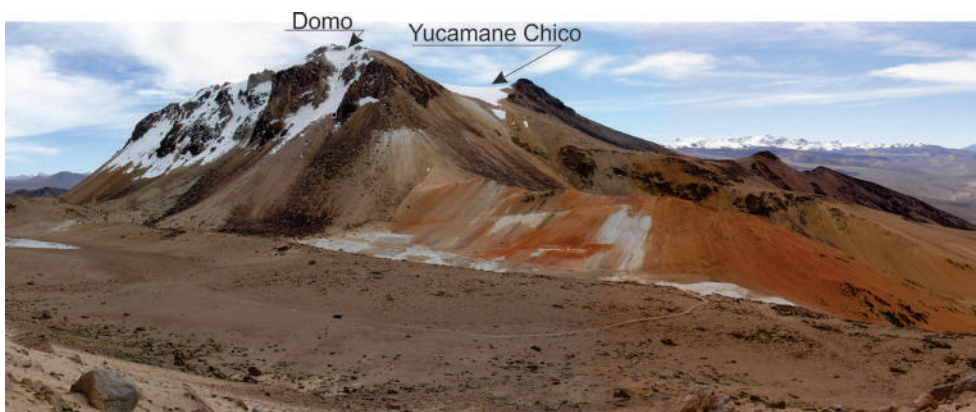


Figura 2.3 Vista del sector sur del volcán Yucamane Chico. Nótese la pendiente empinada del sector sur del domo de lava, el cual corta lavas alteradas e hidrotermalizadas de color rojizo.

2.1.4 Altiplanicie ignimbrítica del Pleistoceno (PI-ig)

Corresponde a una altiplanicie conformada por un depósito de flujos de pómez y ceniza de color gris claro, poco consolidado, bastante voluminoso, que aflora al pie del flanco sur, suroeste y oeste del volcán Yucamane, entre los ríos Callazas y Salado, así como en los sectores San Lorenzo, Yucamane Pampa, Totorá y Aricota. Este depósito se caracteriza por presentar superficies subhorizontales, que varían entre 2° a 6° de inclinación, con dirección sur (Figura 2.2). Estos flujos son disectados por los ríos Salado y Callazas, así como quebradas angostas, algunas profundas y estacionales.

2.1.5 Flujos de lava del volcán Calientes (Lav-Ca1-2)

El volcán Calientes es un estratocono de forma asimétrica, constituido por una secuencia de flujos de lava sobrepuestos y a su vez destruido en su sector sureste, tal es así, que se observan lavas concentradas en el sector NO (Figura 2.4). Este volcán se ha edificado entre los 4300 y 4980 m s. n. m. En su sector occidental, se observa un flujo de lava bien preservado que ha recorrido más de 4.8 km de distancia. En el sector SE, se localiza un complejo de domos de 0.9 km de diámetro y 520 m de alto (Figuras 2.1 y 2.4), emplazado sobre los 4800 m s. n. m.

Los flujos de lavas presentan aún estructuras de flujo como bordes de encauzamiento (*levees*), cordones y otros (Figura 2.1). Las lavas tienen una base masiva y un tope que contiene bloques muy angulosos. Conforman relieves de baja a alta pendiente,

entre 5° a 45° (Figura 2.2). Desde luego, las lavas de baja pendiente están localizadas en la parte inferior del volcán (**lavas del cono inferior**), mientras que las lavas de fuerte pendiente están localizadas en la parte media y superior del volcán (**lavas del cono superior**). Estas lavas fueron emitidas posiblemente durante el Pleistoceno superior, ya que fueron poco afectadas por la actividad glacial del Pleistoceno-Holoceno.

2.1.6 Flujos de lava del volcán Yucamane (La-Yu1-2)

El volcán Yucamane presenta un cono simétrico y mejor conservado que el volcán Calientes (Figura 2.5). Se eleva desde los 3800 m s. n. m. hasta los 5595 m s. n. m. En la parte baja, las lavas poseen pendientes poco inclinadas, que tienen entre 5° y 15° de inclinación, mientras que las lavas de las partes altas, localizadas sobre los 4800 m s. n. m., presentan pendientes mayores a 25° de inclinación (Figura 2.2). Este volcán está conformado por una intercalación de flujos de lava y algunos depósitos volcanoclásticos. Las lavas recorrieron menos de 5 km de distancia respecto al cráter. El cono tiene una altura aproximada de 1600 m y un volumen aproximado de 26 km³.

Algunos flujos de lavas localizados al pie del flanco sur (cono medio) presentan estructuras de flujo, como bordes de encauzamiento y *levees*. Las lavas conforman relieves de baja a elevada pendiente, entre 5° a 45° (Figura 2.2). Las lavas de la base del volcán han sido principalmente afectadas por la erosión glacial, registrada durante el LGM (último máximo glacial) -ocurrido entre 25 y 17 ka (Smith et al., 2008)-, y los reavances glaciares posteriores al LGM.



Figura 2.4 Vista del volcán Calientes. Nótese los domos de lava localizados al extremo SE de dicho volcán.



Figura 2.5 Vista del sector suroccidental del volcán Yucamane. Nótese la pendiente elevada del cono medio y superior del volcán.

2.1.7 Cráter

Al interior del complejo volcánico Yucamane-Calientes se distinguen al menos dos cráteres recientes en la cima del volcán Yucamane. Uno de ellos tiene aproximadamente 600 m de diámetro, localizado en la cima del volcán; a su vez, en su interior, este alberga un segundo cráter más reciente de 360 m de diámetro y 120 m de profundidad (Figura 2.6). Este último

está ubicado sobre los 5490 m s. n. m. Al fondo de dicho cráter, se distinguen acumulaciones de fragmentos de lavas andesíticas angulosas. Las paredes de este último cráter están constituidas de flujos de lavas frescas, como también lavas hidrotermalizadas y fracturadas, que se hallan parcialmente cubiertas por depósitos de caídas de ceniza re TRABAJADAS.

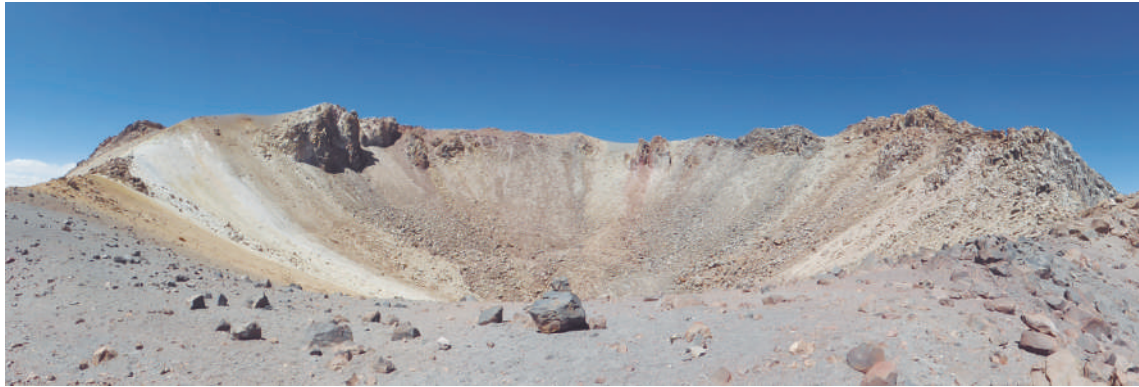


Figura 2.6 Cráter reciente del volcán Yucamane en cuyo interior se distinguen escombros de talud.

2.1.8 Domos de lava (D)

En el área de estudio se distingue un domo (D1) y un complejo de domos (D2) dispuestos de forma cónica e irregular que presentan laderas de moderada a fuerte pendiente (30° - 70°). Estos domos fueron emplazados en diversos periodos y se presentan según el siguiente orden cronológico:

El domo (D1) está localizado al sur del volcán Yucamane Chico y es uno de los domos más antiguos que existe al norte del complejo volcánico Yucamane-Calientes (Figura 2.3). Tiene forma semi-circular y mide aproximadamente 900 m de diámetro y 300 m de altura.

Por otro lado, el complejo de domos (D2) está ubicado en el sector SE del volcán Calientes (Figura 2.5). Dicho complejo tiene forma cónica y mide ~900 m de diámetro y ~520 m de altura.

Tanto el domo como el complejo de domos están cubiertos por cenizas emitidas durante la actividad explosiva Holocénica del

Yucamane. Temporalmente, en época de lluvia, los domos están cubiertos por un delgado casquete de nieve y hielo.

2.1.9 Zona de depósito de avalancha de escombros (Av)

Corresponde a una zona relativamente plana con algunas colinas cónicas (*Hummoks*), que tienen entre 10 a 50 m de altura; está localizada al pie del flanco sur y sureste del volcán Yucamane (Figura 2.7), en inmediaciones de la margen derecha del río Salado y poblado de Santa Cruz. Estas colinas forman relieves ligeramente ondulados, poco abruptos. Esta zona está constituida por depósitos de avalancha de escombros y se caracteriza por presentar bloques lávicos densos de diferente diámetro, incluso de tamaños métricos, dispersos en la superficie. Estos depósitos son disectados por quebradas poco profundas y algunas estacionales.



Figura 2.7 Vista de la zona del depósito de avalancha, localizada al pie del flanco sur del volcán Yucamane.

2.1.10 Altiplanicie y ladera de volcanoclásticos (Vol)

Corresponde a una zona amplia de suave pendiente (menor de 10° de inclinación), localizada al pie del flanco noreste, este, sur y suroeste del volcán Yucamane (Figura 2.1). Está constituida de una intercalación de flujos de escombros (lahares), depósitos de caída de lapilli de pómez y flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y bloques y ceniza, que presentan superficies de baja a moderada pendiente. Estos depósitos son poco o nada consolidados, debido a ello son surcados por quebradas angostas y poco profundas.

2.1.11 Altiplanicie de caída de pómez (Pi)

Corresponden a una zona de altiplanicie de suave pendiente (<10° de inclinación), localizada al pie del flanco este del complejo Yucamane-Calientes (Figura 2.1). En este complejo afloran principalmente depósitos de caída de lapilli de pómez, emitidas durante la última erupción explosiva del volcán Yucamane, que ocurrió hace aproximadamente 3270 años AP. Estos depósitos recubren secuencias de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, andesíticas y dacíticas, del volcán Yucamane.

2.1.12 Abanico piroclástico (A-pi)

Zona poco extensa y de suave pendiente (8° a 15° de inclinación), localizada al pie del flanco noreste del volcán Yucamane (Figura 2.1), entre los volcanes Yucamane y Calientes, en inmediaciones del sector de Cambaya. Esta zona de abanico está constituida principalmente por depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza andesítica emitidos durante la erupción de hace 3270 ka AP, que cubren depósitos de lahares y depósitos de flujos de bloques y cenizas. Esta zona es disectada por quebradas angostas y poco profundas, que se prolongan hasta 2.5 km de distancia.

2.2 DE ORIGEN GLACIAR

Durante el Pleistoceno superior y Holoceno, en los Andes centrales, se han venido produciendo periodos glaciares. Entre ellos, el más importante denominado el Último Avance Glaciar Máximo (LGM), periodo en el que gran parte de los Andes fue cubierto de hielo y nieve. Según Zech et al. (2009) y Mayle et al. (2009), ocurrió entre 24 y 17 ka, mientras que Clapperton (1993) afirma que ocurrió entre 18 y 12 ka.

Bromley et al. (2009), en base a estudios realizados sobre morrenas que afloran en el complejo volcánico Coropuna, afirman que el LMG ocurrió entre 25 y 16 ka, mientras que estudios realizados por Alcalá et al. (2007), sobre morrenas del volcán nevado Hualca Hualca y el complejo Ampato-Sabancaya (Arequipa), muestran que el LGM ocurrió entre 17 y 18 ka. Posteriormente, en los Andes centrales se han tenido reavances glaciares, que ocurrieron entre 18 y 14 ka (periodo Tardiglaciar) y entre 12 y 10 ka. Este último probablemente asociado a la anomalía climática denominada *Younger Dryas* (Clapperton, 1993; Zech et al., 2007; Alley, 2000). También se tuvieron reavances glaciares durante el Neoglaciar, es decir en los últimos 5 ka.

Las geoformas que a continuación se describen fueron modeladas principalmente durante las glaciaciones del Pliocuaternario. Actualmente, los volcanes en estudio solo tienen una cobertura de nieve y hielo de poco volumen de manera estacional.

2.2.1 Geoformas de erosión

- **Circos glaciares**, este tipo de morfología se localiza al norte del complejo Yucamane-Calientes, en zonas colindantes con el volcán San Pedro y el volcán Nazaparco. Estos circos presentan formas semicirculares y cóncavas.
- **Valles glaciares**, se distinguen dos valles localizados en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes, entre los 3200 a 4500 m s. n. m.: a) uno de los valles se localiza en la naciente del río Callazas (oeste del Yucamane), que se prolonga hasta el sector de San Lorenzo; y b) el segundo se localiza en la naciente del río Salado-Calientes y corresponde a un valle glaciar abierto en forma de «U» o artesa (Figura 2.8), que se prolonga hasta la zona de Huajtavira. Al fondo de estos valles se encuentran depósitos de flujos de escombros, así como depósitos aluviales dispuestos en forma de terrazas escalonadas, que en total miden más de 10 m de altura.

Otros valles glaciares son afluentes de los ríos Callazas y Salado-Calientes, y muestran un drenaje radial. Entre las quebradas afluentes que destacan son las quebradas Nazaparco, Aruma, Gentilcahua, Campanani y Condorcahua (hacia el río Callazas).



Figura 2.8 Valle del río Salado relleno de sedimentos fluvio-aluviales en inmediaciones del sector de Pampa Cambaya (este del volcán Yucamane).

2.2.2 Geoformas de acumulación

Las morrenas son geoformas de acumulación, producto de los periodos de desglaciación que ocasionan la erosión, acarreo y acumulación de las estructuras rocosas. En inmediaciones del complejo Yucamane-Calientes se distinguen al menos dos generaciones de morrenas, las cuales serán descritas a continuación.

- **Morrenas del Pleistoceno.** Estas morrenas corresponden a acumulaciones de bloques de rocas de naturaleza

heterogénea, principalmente lavas, incluidas dentro de una matriz areno-limosa, suelta. Las morrenas del Pleistoceno están distribuidas al pie de los flancos oeste, sur y SE del volcán Yucamane (Figura 2.9), muchas veces descansando sobre lavas de dicho volcán. Estas tienen formas alargadas y miden entre 8 y 20 m de altura y más de 500 m de longitud (Figura 2.9). Estas morrenas son las más alejadas y voluminosas respecto a las morrenas recientes que afloran en inmediaciones del volcán Yucamane.

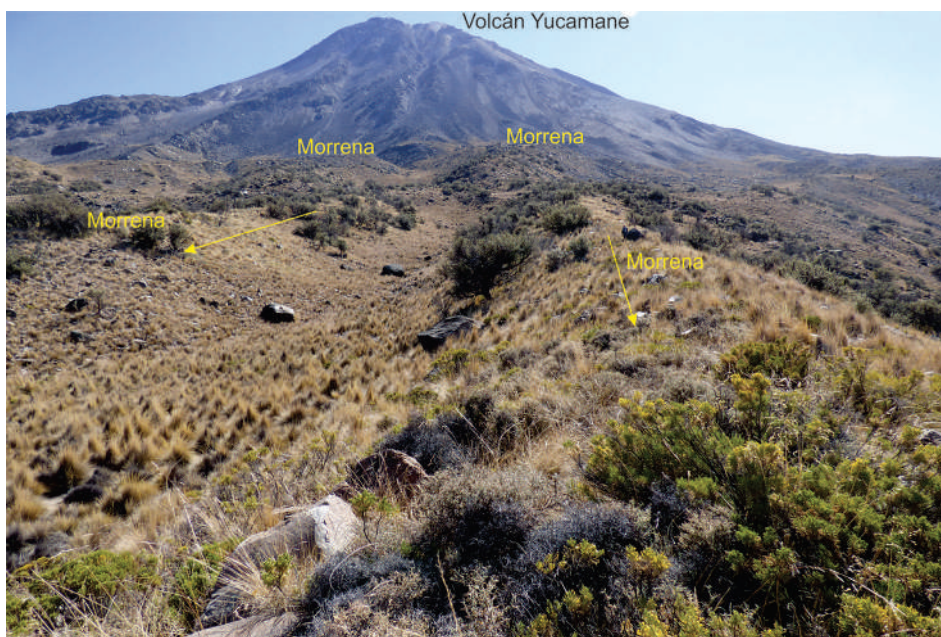


Figura 2.9 Morrenas que afloran al pie del flanco sur del volcán Yucamane.

- **Morrenas del Holoceno.** Corresponden a morrenas que están localizadas justo al pie del flanco sur y SE del volcán Yucamane, que descansan sobre las morrenas del Pleistoceno o sobre las lavas del Yucamane. Estas tienen formas alargadas y miden entre 3 y 16 m de altura y más de 200 m de longitud. Se destacan por presentar una mezcla heterogénea de bloques de rocas esencialmente volcánicas, incluidas dentro de una matriz areno-limosa. Dado que estas morrenas presentan morfologías frescas, son poco voluminosas y están localizadas al pie de las laderas; se asume que fueron emplazadas durante el Holoceno.
- **Sedimentos glaciares, aluviales finos, y bofedales.** Rellenan las depresiones ubicadas al oeste, norte y NE del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Forman extensas superficies planas.

2.3 OTRAS GEOFORMAS

A continuación se hace una breve descripción de otras geoformas distinguidas en el área de estudio.

2.3.1 Valles

El complejo volcánico Yucamane-Calientes separa dos valles principales de gran extensión: valle de los ríos Callazas y

Calientes, cuyos cursos medios y bajos tienen una dirección promedio N-S. Presenta perfiles transversales asimétricos y laderas de moderada a fuerte pendiente. Por ejemplo, el valle del río Calientes presenta perfiles muy estrechos y a veces encañonados, como las que se distinguen en el sector de Calleraco (Figuras 2.1, 2.2, 2.10).

En algunos sectores como Marjani y Aricota, los valles son relativamente amplios, pues sobrepasan los 260 m de ancho; las laderas de dicho valle son inclinadas y de poca altura, entre los 100 a 200 m (Figura 2.11).

2.3.2 Pampas

Las pampas son áreas semiplanas, extensas, y de topografía de poca pendiente, localizadas alrededor del complejo Yucamane-Calientes (Figura 2.2). Están disectadas por quebradas poco profundas. Se distinguen varios tipos de pampas: área hidromórfica de pajonales, área desértica de muy escasa vegetación, área desértica rocosa y nival, etc. Por ejemplo, el área desértica de muy escasa vegetación puede observarse hacia el oeste del área de estudio: pampa de Colpapampa, Huaycuta, Pagrilaca, La Puntera, San Lorenzo (Figura 2.12), El Pajonal, Patapatani y La Esperanza.



Figura 2.10 Valle del río Salado en inmediaciones del sector de Calleraco, al sur del volcán Yucamane.



Figura 2.11 Valle del río Callazas en inmediaciones del sector de Marjani. Nótese el amplio valle agrícola, localizado al sur del volcán Yucamane.



Figura 2.12 Vista de la Pampa San Lorenzo, al oeste del volcán Yucamane.

CAPÍTULO III

GEOLOGÍA

3.1 MARCO TECTÓNICO REGIONAL Y LOCAL

3.1.1 Estructuras tectónicas regionales

En base al análisis de imágenes satelitales Aster 2006, Landsat, imagen Google earth, los datos de campo, y los trabajos realizados por Morche et al. (1994) y Martínez et al. (2003) se ha podido diferenciar dos sistemas principales de fallas y/o lineamientos (Figura 3.1) que se desarrollaron dentro de un marco tectónico extensional:

- **El sistema de fallas NO-SE:** es el de mayor longitud y forma parte del sistema de fallamiento de dirección andina. Este sistema controla el emplazamiento de los volcanes pliocuaternarios en el extremo occidental de los Andes Centrales. En inmediaciones del complejo Yucamane-Calientes, estas fallas son de corta extensión y atraviesan los cursos de los ríos Tacalaya, Maure, Jaruma y Uchusuma. Asimismo, en la margen derecha del río Callazas, se distinguen fallas normales de dirección NO-SE, como las observadas en inmediaciones del poblado de Talaca (Figuras 3.2 y 3.3). El sistema NO-SE se encuentra cortando rocas del substrato, que en esta zona están constituidas por rocas del Cretáceo (Formación Toquepala) y Mioceno (Formación Huaylillas).

La principal estructura regional de dirección NO-SE es el sistema de fallas Incapuquio, que tiene un rumbo preferencial N 40°-60°O y su traza se reconoce a 30 km al suroeste del volcán Yucamane, en el sector de Aricota. Estas fallas se prolongan desde Chile (Sistema de Fallas Domeyko) hasta el valle de río Tambo, con una longitud mayor a los 180 km. Es un sistema de fallas de tipo transcurrente sinistral (Acosta et al., 2012). Se puede asociar a este sistema de fallas la ocurrencia de las manifestaciones geotermales de la quebrada Azufre, cerca al Tutupaca, así como la denominada falla Banco, cerca de la laguna Suches.

- **El sistema de fallas NE-SO.** Se observa al S, O, NO y NE del complejo volcánico Yucamane-Calientes (Figura 3.1). Corresponde principalmente a fallas normales con desplazamiento vertical. Los escarpes son casi verticales, de decenas a centenas de metros de longitud. A este sistema de fallas se le relaciona con la presencia de manifestaciones

geotermales, que se localizan en el río Salado-Calientes, al noreste del complejo Yucamane-Calientes.

3.1.2 Estructuras tectónicas locales

Según el tipo de rumbo, las estructuras tectónicas locales se pueden clasificar en dos grupos:

- a) Fallas recientes de dirección NO-SE, tales como la falla Yucamane Chico y falla Iscaylarjanco, localizadas al NE del complejo Yucamane-Calientes (Figura 3.1). Corresponden a fallas normales con poco desplazamiento.
- b) Sistema de fallas normales al norte del área de estudio, los cuales cortan depósitos cuaternarios. Estas fallas son Anacota, Vallecito y Amarillo (en línea con los volcanes Yucamane, Calientes y Yucamane Chico), y cortan depósitos de morrenas y fluvio glaciares.

3.2 ESTRATIGRAFÍA DEL SUBSTRATO (PRE-YUCAMANE)

Las rocas que conforman el substrato del área de estudio corresponden a formaciones sedimentarias del Jurásico y Cretáceo, así como secuencias volcánicas emplazadas entre el Eoceno y el Pleistoceno. A continuación, se describen las características de dichas formaciones y/o secuencias.

3.2.1 Formación Labra (Jurásico) (*Js-La*)

Entre 8 y 12 km al suroeste del volcán Yucamane, en ambas márgenes del río Callazas (inmediaciones del sector Marjani), se distinguen afloramientos de areniscas cuarzosas blanquecinas y grises, dispuestos en capas gruesas que miden hasta 4 m de espesor, con intercalaciones de areniscas y lutitas carbonosas, de color gris oscuro a negro (Figura 3.4). En la base predominan secuencias de areniscas y lutitas carbonosas gris oscuras. Estas secuencias han sido asignadas a la Fm. Labra del Grupo Yura por De la Cruz & De la Cruz (2000).

En el tope, se observa algunos niveles de calizas de color marrón grisáceo que tienen hasta 3 m de espesor, intercalados con capas de areniscas cuarzosas, con un espesor total mayor a 80 m. Las capas muestran predominantemente fracturas verticales. Estas secuencias en general muestran ligero plegamiento y forman paredes escarpadas (Figura 3.5).

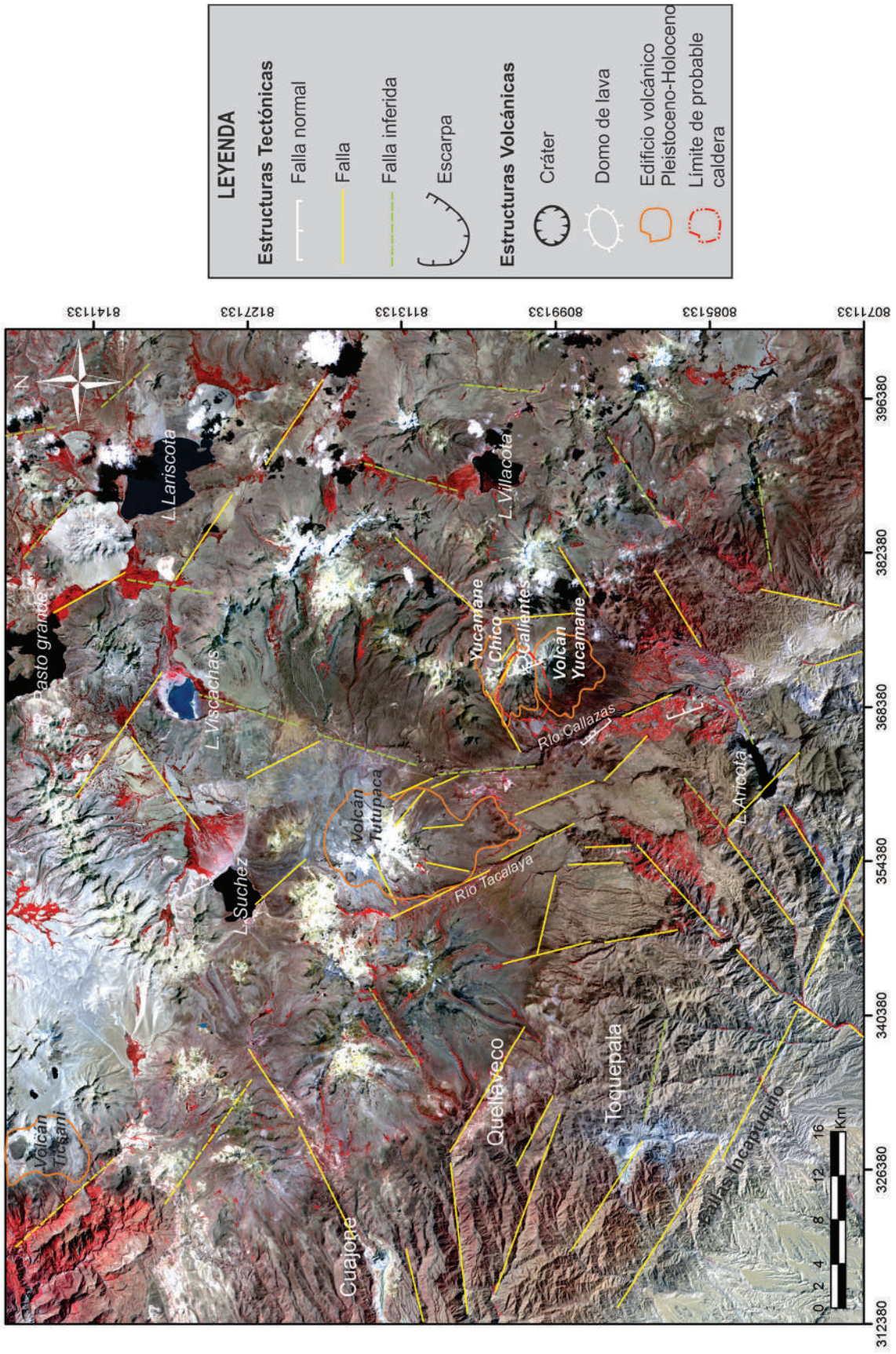


Figura 3.1 Imagen Aster 2006 en donde se han resaltado las estructuras tectónicas aledañas al complejo volcánico Yucamane-Calientes.



Figura 3.2 Fallas normales de dirección NO-SE en el sector de Talaca, en la margen derecha del río Callazas. Los escarpes de fallas son semiverticales y tienen menos de 40 m de salto.



Figura 3.3 Falla normal de dirección NO-SE al noreste de la localidad de San Pedro, margen derecha del río Callazas. Los escarpes de fallas son semiverticales y miden hasta 8 m de alto.



Figura 3.4 Secuencia de areniscas cuarzosas de la Fm. Labra (Grupo Yura) en el sector Marjani.



Figura 3.5 Secuencia de areniscas cuarzosas intercalada con niveles de lutitas pertenecientes a la Formación Labra (Grupo Yura), visible en la margen izquierda del río Callazas.

3.2.2 Formación Hualhuani (Jurásico superior-Cretáceo inferior) (Ki-Hu)

A 3 km al pie del flanco suroeste del volcán Yucamane, se distingue un pequeño afloramiento de areniscas cuarzosas gris blanquecinas (Figura 3.6), dispuestas en capas masivas, de espesor centimétrico a métrico, e intercalados con algunos niveles de limolitas de color gris a gris verdoso. Según De la Cruz & De la Cruz (2000), esta secuencia pertenecería a la

Formación Hualhuani, que forma parte del Grupo Yura. Aunque en el campo no ha sido posible distinguir el contacto entre la Fm. Labra y la Fm. Hualhuani -pero teniendo en cuenta la relación estratigráfica del sur peruano-, se asume que las areniscas de la Fm. Hualhuani descansan sobre las areniscas cuarzosas de la Fm. Labra (INGEMMET, 1995). A la vez, las areniscas de la Fm. Hualhuani están cubiertas por depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza y lahares alterados, probablemente pertenecientes al Grupo Tacaza.



Figura 3.6 Afloramiento de areniscas cuarzosas de la Fm. Hualhuani al pie del flanco suroeste del volcán Yucamane

3.2.3 Grupo Toquepala (Cretáceo Superior-Eoceno) (KsP-To)

Corresponde a una secuencia estratificada de depósitos de flujos piroclásticos de color blanquecino, depósitos de lahares y niveles de areniscas y limolitas que se presentan en capas ligeramente deformadas. Este grupo se emplazó en el sur peruano entre 95 y 41 Ma (Mamani et al., 2010). El espesor total de la secuencia se estima en aproximadamente 1800 m. Esta secuencia aflora alrededor de la laguna Aricota (al suroeste del volcán Yucamane) e infrayace a las ignimbritas de la Formación Huaylillas. Los depósitos de flujos piroclásticos están compuestos de fragmentos líticos y pómez incluidos dentro de una matriz fina bastante alterada. Los depósitos son de colores beige, verde y violeta. Se intercalan niveles de lahares de color gris-marrón, compuestos de bloques polimícticos, la mayoría de origen volcánico, englobados en una matriz de arena gruesa.

Estos depósitos están intercalados con estratos lenticulares de limolitas grises y areniscas finas. Las ignimbritas de la Formación Huaylillas yacen en ligera discordancia angular sobre las capas del Grupo Toquepala.

3.2.4 Formación Tacaza (Oligoceno) (P-Ta-P-Ta2)

Las rocas que conforman el Grupo Tacaza tienen una amplia distribución geográfica a lo largo de la Cordillera de los Andes del sur peruano. Dataciones realizadas por Wasteneys (1990); Sanderman et al. (1995); Mamani et al. (2010); Thouret et al. (2016) y otros autores en rocas del Grupo Tacaza determinaron una edad de emplazamiento que varía entre 30 a 24 Ma (Oligoceno-Mioceno).

En la presente área de estudio, hemos diferenciado al menos tres secuencias volcánicas pertenecientes al Grupo Tacaza.

Aproximadamente, a 7 km al pie del flanco sur del volcán Yucamane, aflora una secuencia de flujos de lava andesítica poco fracturada, cubierta por depósitos de flujos de bloques y ceniza consolidados, masivos, poco alterados y de color amarillento, perteneciente al Grupo Tacaza. La secuencia mide más de 80 m de espesor y forma pequeñas colinas.

El centro volcánico Estrone, ubicado a 8 km al suroeste del volcán Yucamane (margen derecha del río Callazas), también se considera como parte del Grupo Tacaza, ya que está cubierto, en parte, por ignimbritas de la Formación Huaylillas. Este volcán está inactivo y erosionado, y está constituido por flujos de lava andesítica, cubierta por niveles de flujos piroclásticos de pómez y ceniza.

3.2.5 Formación Huaylillas (Mioceno inferior-superior) (Nm-Hu1-3)

Corresponde a depósitos ignimbríticos que afloran en la Pampa Pagrilaca, sector Alto de Quilahuani y al oeste de los poblados de Candarave, San Pedro y Pallata (Figura 3.7); es decir, al S y SO del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Estos depósitos son de colores blanco rosáceo a rojo pálido, de composición dacítica a riolítica, dispuestos en capas subhorizontales, con espesores individuales superiores a 6 m y un espesor total entre 80 y 400 m. Estos depósitos se encuentran bastante consolidados y a veces soldados, como se observa en inmediaciones del sector de Calleraco (Figura 3.8). Infrayacen en discordancia angular a rocas volcánicas del Grupo Barroso.



Figura 3.7 Secuencias ignimbríticas de la Fm. Huaylillas, visibles en la margen derecha del río Callazas, sectores Pallata y Talaca.

A nivel regional, la Formación Huaylillas corresponde a una secuencia de depósitos ignimbríticos de composición dacítica a riolítica -emplazada entre 10 a 24 Ma-, que aflora en la zona altoandina de las regiones de Tacna y Moquegua, y se prolonga hasta el territorio chileno (Mamani et al., 2010; Worner et al., 2002). En su mayoría, estas ignimbritas fueron generadas durante un volcanismo altamente explosivo, que se asocia a la formación de calderas volcánicas.

En la zona de estudio, a 30 km al sureste del complejo volcánico Yucamane-Calientes, las rocas de la Fm. Huaylillas han sido

datadas por el método K/Ar en 21.6 ± 0.7 Ma (Tosdal et al., 1981), y a 35 km hacia el oeste del complejo volcánico Yucamane-Calientes también se ha datado por el método K/Ar en 14.2 ± 0.2 Ma y 18.9 ± 0.3 Ma (Quang et al., 2005).

La mayoría de afloramientos de la Formación Huaylillas en inmediaciones del complejo Yucamane-Calientes se conserva por la poca erosión, debido al clima árido que predomina en la zona, y porque fundamentalmente son ignimbritas consolidadas y a veces soldadas, que en total miden entre 80 y 400 m de espesor.



Figura 3.8 Secuencia de flujos de pómez y ceniza soldados y consolidados, perteneciente a la Fm. Huaylillas que aflora al sur del poblado Calleraco (curso medio del río Salado).

3.2.6 Grupo Barroso (Mioceno-Pleistoceno) (N-LE; N-NA; N-Sa)

El Grupo Barroso está conformado por secuencias de flujos de lavas, así como por depósitos de flujos piroclásticos de composición andesítica y dacítica, originadas por erupciones de tipo efusivo y explosivo. El Grupo Barroso, en el sur peruano, está dividido en dos miembros:

(1) Un miembro inferior, constituido por flujos de lava de los complejos volcánicos andesíticos que están presentes de norte a sur, entre 16° y 20° S, sobre el basamento de la Cordillera Occidental, y que fueron emplazados durante el Mio-Plioceno (10-3 Ma, Mamani et al., 2010). En los alrededores del complejo volcánico Yucamane-Calientes, existen varios estratovolcanes y complejos volcánicos, que por su posición estratigráfica, así como por el alto grado de erosión y alteración, se asume que pertenecen al Grupo Barroso inferior. Entre los centros volcánicos asignados al Grupo Barroso se encuentran los centros volcánicos Nazaparco (al norte), San Pedro (al NE) y López Extraña (al este), como se aprecia en las Figuras 3.9 y 3.10. Algunas dataciones radiométricas confirman que pertenece al Grupo Barroso. En efecto, una datación radiométrica

efectuada en una lava del volcán Nazaparco arroja una edad de 5.6 ± 0.2 Ma (Martínez & Cervantes, 2003).

Una datación radiométrica K-Ar efectuada recientemente en un flujo de lava de la base del volcán Yucamane Chico arroja una edad de 5.5 ± 0.08 Ma y correspondería al miembro inferior del Grupo Barroso. Esta información es corroborada por el grado de erosión similar que presenta el edificio Yucamane Chico con respecto a los otros estratovolcanes de la Fm. Barroso identificados en la zona (Nazaparco, San Pedro y López Extraña).

(2) Un miembro superior, constituido por lavas y depósitos volcánicos asociados a los edificios volcánicos «andesíticos», emplazados en la Cordillera Occidental durante el Plio-Pleistoceno (3 a 1 Ma) (Benavides, 1999; Mamani et al., 2010). En el área de estudio, no se han reconocido secuencias volcánicas que pertenezcan al miembro superior del Grupo Barroso. Por ello, es necesario realizar dataciones radiométricas en rocas de los volcanes «antiguos» o extintos que afloran en las inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes, para determinar si algunos de ellos corresponden a dicho miembro.



Figura 3.9 Vista del flanco oeste del volcán López Extraña. Este volcán es inactivo y erosionado, cuyas rocas presentan alto grado de alteración hidrotermal.



Figura 3.10 Vista del flanco sur del volcán Nazaparco, localizado al noroeste del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Este volcán es inactivo y se encuentra bastante erosionado.

3.2.7 Volcán Yucamane Chico (Np-Yu)

Es un volcán parcialmente erosionado, localizado al norte del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Está constituido por secuencias de flujos de lava andesíticas, de textura porfírica, masivas, alteradas e hidrotermalizadas que recorrieron distancias de hasta 5 km desde el centro de emisión. Los remanentes de este volcán afloran al NE del complejo Yucamane-Calientes; son de forma alargada, en dirección NO-

SE, y tienen aproximadamente 5 km de largo. Este edificio fue parcialmente destruido probablemente debido a colapsos de flanco y glaciaciones registradas en el Pleistoceno y Holoceno, por lo que estimamos que presentó actividad predominantemente efusiva durante el Mioceno hasta el Pleistoceno.

La disposición de los flujos de lava y su morfología actual señalan tres generaciones de lavas:

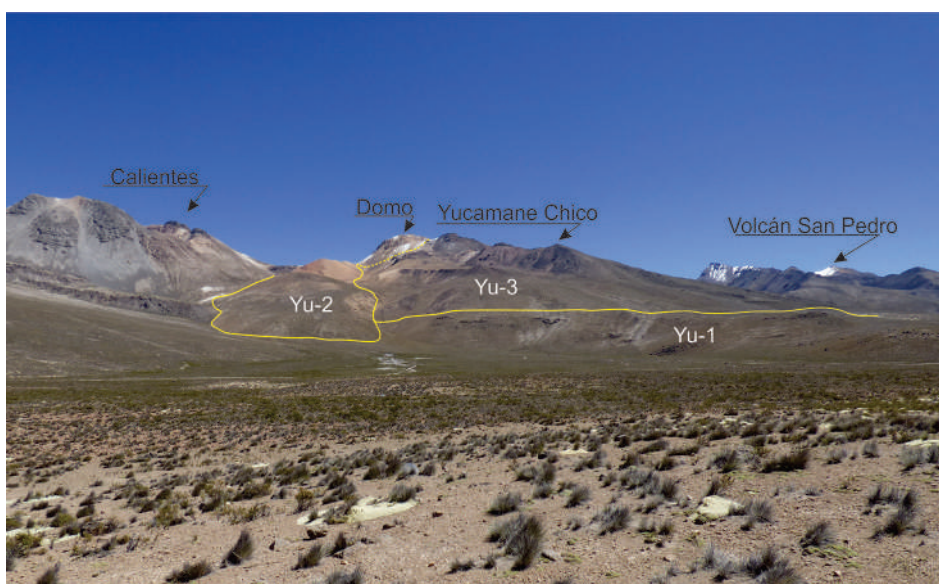


Figura 3.11 Vista del flanco este del volcán Yucamane Chico, en la cual se distinguen los productos de las diferentes etapas de evolución (Yu-1 al Yu-3).

3.2.7.1 Flujos de lava de primera generación (Np-Yu-1)

Estas lavas yacen en la base del volcán (Figura 3.11) y fueron emplazadas sobre rocas del substrato, en partes constituidas por lavas del Mioceno. Las lavas de esta unidad están fuertemente alteradas e hidrotermalizadas y presentan una morfología de pendientes suaves. Estas lavas afloran en la margen derecha del río Calientes y en la margen izquierda de la quebrada Aruma. Las lavas son de composición andesítica y están constituidas por fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y anfíbol, y son de textura porfírica. Una lava de la base del volcán Yucamane Chico fue datada en este estudio por el método K/Ar en 5.5 ± 0.08 Ma, por lo que se considera que la base del Yucamane Chico es contemporánea a la Fm. Barroso inferior.

3.2.7.2 Flujos de lava de segunda generación (Np-Yu-2)

Estos flujos cubren un área poco extensa, que forma crestones con pendientes moderadas, al pie de las laderas y en las partes medias y superiores del volcán Yucamane Chico. Los

flujos alcanzaron cerca de 5 km de la fuente, y sobreyacen a las lavas de la primera generación (Figura 3.11). Las lavas son de composición andesítica y dacítica, y están constituidas por fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y anfíbol. Son de textura porfírica.

3.2.7.3 Flujos de lava de tercera generación (Np-Yu-3)

Estos flujos afloran en la parte superior del volcán Yucamane Chico, visibles en los sectores norte y noreste, cubriendo un área poca extensa. Corresponden a lavas andesíticas, afaníticas y porfíricas con cristales de plagioclasa, piroxenos y eventualmente anfíboles. Las lavas tienen pendientes moderadas, que varían entre 10° a 30° de inclinación. Los flujos alcanzaron cerca de 4 km de la fuente y sobreyacen a las lavas de la primera, segunda y tercera generación. Al norte del volcán, los frentes de lavas están en contacto con lavas del estratovolcán San Pedro (Figura 3.11). Dada su mayor pendiente, definen una discordancia con los flujos subyacentes. Son flujos menos potentes que los anteriores.

3.3 ESTRATIGRAFÍA Y EVOLUCIÓN DEL COMPLEJO VOLCÁNICO YUCAMANE-CALIENTES

Según la disposición y distribución de los depósitos emitidos por los volcanes Calientes y Yucamane, así como sus características morfológicas, grado de erosión y superposición de sus depósitos, se asume que el volcán Calientes es el más antiguo de dicho complejo. Pero no se descarta que en algún momento los dos volcanes hayan tenido algunas fases eruptivas coetáneas.

Los distintos productos volcánicos emplazados por los volcanes Yucamane y Calientes atestiguan una actividad eruptiva compleja, con actividad explosiva y efusiva, tal como se representa en la Figura 3.12. Para una mejor comprensión de la evolución del complejo, describiremos la estratigrafía de cada estratovolcán de manera separada.

3.3.1 Estratovolcán Calientes

La disposición de sus depósitos y sus características morfoestructurales sugieren que el estratovolcán Calientes se ha construido en cinco grandes periodos denominados «Calientes I» al «Calientes V» (Figura 3.12).

3.3.1.1 Calientes I (PI-Ca1): Flujos de lava

Durante el periodo inicial del volcán Calientes, principalmente este presentó una actividad efusiva que emitió flujos de lava de composición andesítica (60.9 - 61.9 wt.% SiO₂). Estas lavas yacen en la base del volcán Calientes y son visibles en el sector occidental de dicho volcán. Se encuentran dispuestas de manera subhorizontal, buzando ligeramente en dirección oeste, lo cual sugiere que provinieron del volcán Calientes. Estas lavas en su mayoría se encuentran alteradas y forman superficies ovaladas. Las lavas presentan fenocristales de plagioclasa, anfíbol, oxtopiroxeno y clinopiroxeno, incluidos dentro de una pasta afanítica. Su emplazamiento se produjo probablemente en el Pleistoceno, hace más de 126 ka AP (edad de lava superior del volcán Calientes).

Las lavas emplazadas durante la etapa «Calientes I» sobreyacen secuencias de lavas andesíticas del volcán Yucamane Chico (Mioceno-Pleistoceno inferior) y rocas del substrato.

3.3.1.2 Calientes II (PI-Ca2): Depósito de flujo de pómez y ceniza «Basal» (Pleistoceno superior)

Corresponde a una secuencia de depósitos de flujos de pómez y ceniza que aflora al pie del flanco oeste del volcán Calientes y

al sur y sureste del volcán Yucamane. Se extiende a lo largo de los ríos Callazas y Salado hasta cerca de la laguna de Aricota. Estos flujos son poco endurecidos, de color ocre a beige, con un espesor total de 80-100 m. Esta unidad fue datada por France (1985) en 0.54 ± 0.17 Ma (método K/Ar). Estos flujos de pómez y ceniza cubren parcialmente las lavas del periodo «Calientes I», tal como se aprecia en el sector oeste del volcán. Estos flujos rellenaron un paleo relieve de la Fm. Huaylillas y las secuencias sedimentarias del Grupo Yura. Dado el importante volumen de estos depósitos de flujos piroclásticos, se asume que esta secuencia fue emitida durante una erupción paroxismal ignimbítica ligada a un colapso de caldera. En base al mapeo geológico realizado durante este estudio, así como a los datos petrológicos (Capítulos 4 y 5), se puede afirmar que esta ignimbrita está asociada al complejo Yucamane, y cuya caldera probablemente debe encontrarse bajo el volcán Calientes.

En la zona proximal (por ejemplo, en el sector de San Lorenzo), hasta en 8 km del volcán Calientes se distinguen al menos seis unidades de flujos de pómez y cenizas, que miden entre 6 a 12 m de espesor, dispuestos de manera subhorizontal (Figura 3.13). En este sector, algunas capas de la parte media de la secuencia están enriquecidas en fragmentos líticos que corresponden a facies tipo *lag breccia*, es decir, facies localizadas muy próximas al centro de emisión. Asimismo, en el sector de Curancurane, al oeste del volcán Yucamane, existen capas de flujos enriquecidas en bloques líticos, angulosos y subangulosos, que corresponden a facies tipo *lag breccia* (Figura 3.14); aquí los bloques miden hasta 60 cm de diámetro. Estos argumentos sugieren que el evento estuvo ubicado bajo el volcán Calientes.

En la zona medial y distal, es decir, en zonas de más de 8 km del volcán, se distinguen al menos tres niveles de flujo. En estas zonas los flujos son masivos y miden entre 40 y 60 m de espesor (Figura 3.15). El nivel inferior es poco consolidado, mientras que los niveles medio y superior son más consolidados, y presentan disyunción columnar. Los niveles inferiores y medios son de color gris a gris blanquecino, mientras que el nivel superior es de color amarillento. Al interior de los flujos, los bloques de pómez miden hasta 25 cm de diámetro (esto a 20 km al sur del volcán) y eventualmente se han encontrado algunos bloques de hasta 40 cm de diámetro.

Los bloques de pómez al interior de los flujos de pómez y ceniza son de composición dacítica (66.1 - 68.3 wt.% SiO₂). Estos son bastante vesiculados y porfíricos. Contienen fenocristales de plagioclasa que miden hasta 1 cm, así como fenocristales de biotita (0.6 cm), anfíbol (0.4 cm) y óxidos de Fe-Ti.

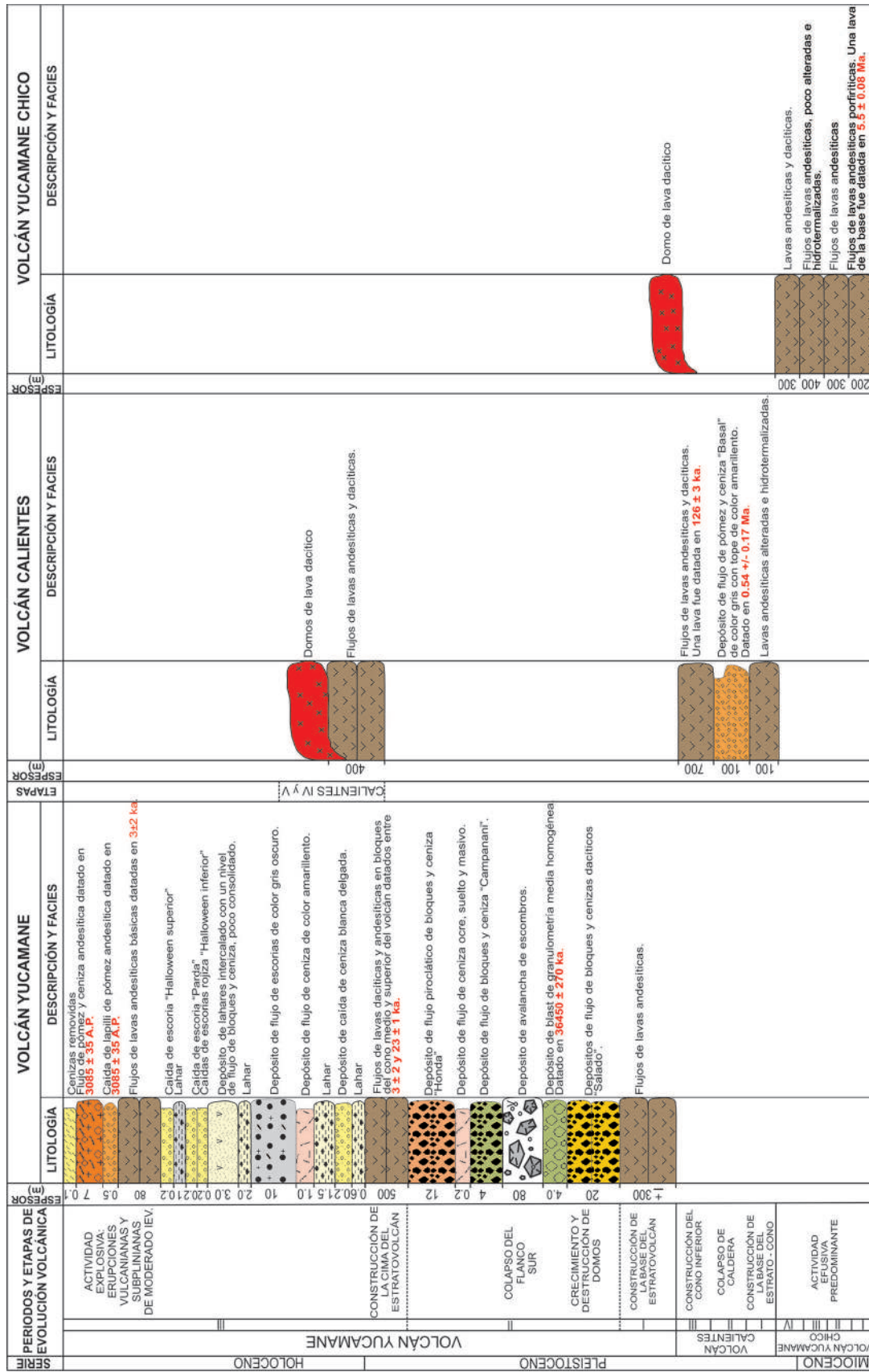


Figura 3.12 Columna litoestratigráfica generalizada e hipótesis de la evolución del complejo volcánico Yucamane-Calientes



Figura 3.13 Depósito de flujo de pómez y ceniza de hace 540 ka que aflora en el sector de San Lorenzo, a 8.5 km al oeste del volcán Yucamane.



Figura 3.14 Depósito de flujo de pómez y ceniza de hace 540 ka, facie lag breccia que aflora en el sector Curancurane, a 5 km al oeste del volcán Yucamane.



Figura 3.15 Depósito de flujo de pómez y ceniza emplazado hace 540 ka, que aflora en inmediaciones del poblado de Yucamane Pampa, a 7.2 km al suroeste del complejo Yucamane-Calientes.

3.3.1.3 Calientes III (PI-Ca3)

Durante este periodo, el volcán Calientes presentó principalmente una actividad efusiva al emitir flujos de lavas en bloques de composición andesítica y dacítica (60.2 - 64.6 wt.% SiO₂). Estas lavas contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita y óxidos de Fe-Ti presentes tanto en las andesitas como en las dacitas. También contienen fenocristales de piroxenos que están presentes en su mayoría en las andesitas.

Estas lavas “Calientes III” afloran en el sector oeste de dicho volcán donde están cubriendo a otros flujos de lava

más antiguos de la unidad “Calientes I” (Figura 3.16). Las lavas de la generación “Calientes III” tienen, en su conjunto, aproximadamente 250 m de espesor y un recorrido menor a 8 km del cráter. Una lava del sector este ha sido datada por el método K/Ar en **126 ± 3 ka**.

Las lavas de la etapa “Calientes III”, emitidas por el volcán Calientes, son las más extensas y voluminosas. Consisten en coladas de lava que fluyeron en dirección oeste y SO del volcán Calientes. Presentan pendientes moderadas. Morfológicamente, presentan superficies “rugosas”, que evidencian limitada alteración o erosión por la actividad glacial.

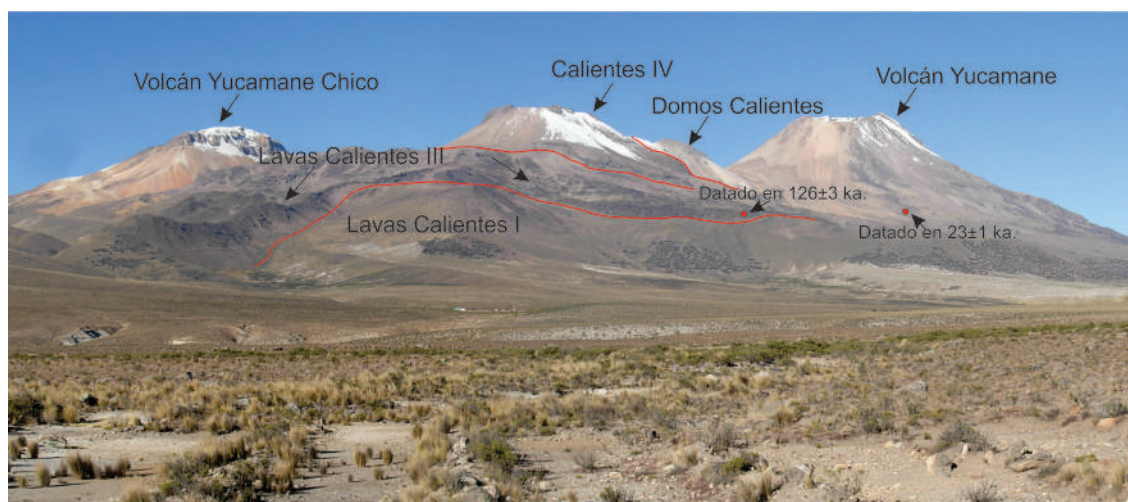


Figura 3.16 Vista del flanco occidental del complejo volcánico Yucamane-Calientes donde se distinguen las lavas andesíticas y dacíticas del volcán Calientes y el domo Calientes.

3.3.1.4 Calientes IV (H-Ca4)

Este periodo es posterior al periodo "Calientes III", en el cual se produce el emplazamiento de flujos de lavas andesíticas y dacíticas (61.9 - 65.1 wt. % SiO₂), dispuestos de manera discordante, y que yacen sobre las lavas de la etapa "Calientes III". Las lavas están empiladas y forman el estratocono superior del volcán Calientes, que está localizado entre los 4800 y 5358 m s. n. m. (Figura 3.16). Las lavas son de textura porfírica, de colores gris claro a gris oscuro. Estas lavas presentan un importante grado de erosión glacial, y sugieren que se emplazaron antes del LMG (25-17 ka, por ejemplo de Zech et al. (2009) y Mayle et al. (2009)).

Posterior al emplazamiento del cono de la cumbre, se produjo el colapso o derrumbe del flanco SE, que emplazó depósitos de avalancha de escombros que probablemente fueron en parte cubiertos por las lavas del volcán Yucamane. El montículo, o restos del estratocono no colapsado (sector NO del volcán),

presenta una pendiente de moderada a fuerte (Figura 3.17). Parte de las lavas se hallan parcialmente hidrotermalizadas.

3.3.1.5 Calientes V (H-D2)

En esta etapa básicamente se emplazó al complejo de domos Calientes.

- Domos de lava

Corresponden a un complejo de domos, constituido por al menos tres domos superpuestos entre sí, emplazados de manera contemporánea. Este complejo aflora al extremo sureste del cono de lava "Calientes IV" (Figura 3.17). Los domos son de composición dacítica y de textura porfírica, con gruesos cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Cubren un diámetro de 1.2 km y una altura de aproximadamente 600 m. En base a la fresca morfología y bajo el grado de alteración de los domos ligados a la actividad glacial, se alega que estos se emplazaron en el Holoceno.

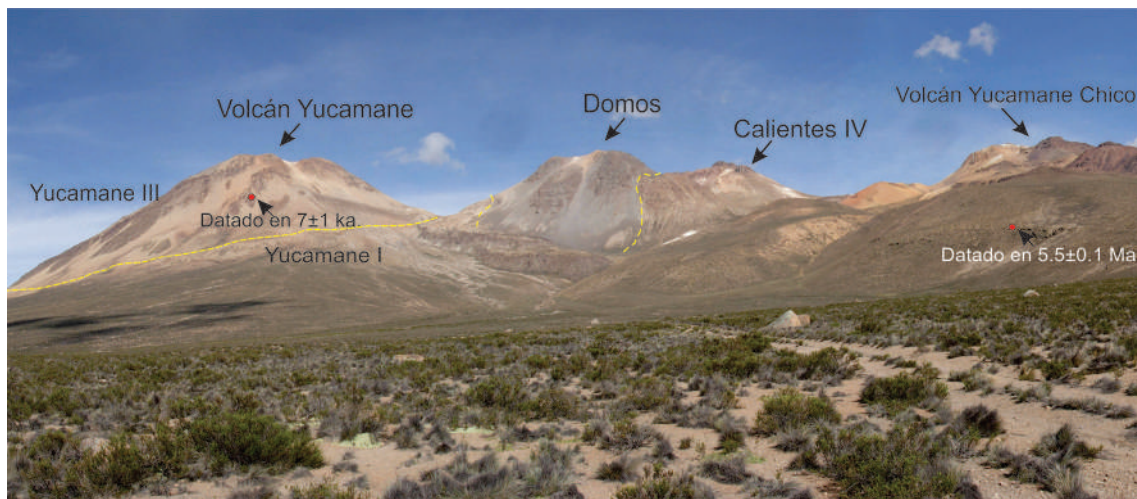


Figura 3.17 En medio de los volcanes Calientes y Yucamane, se distingue un complejo de domos dacíticos que aparentemente no fueron afectados por la actividad glacial del Pleistoceno-Holoceno.

3.3.2 Volcán Yucamane

El volcán Yucamane está conformado por una potente intercalación de flujos de lavas y depósitos de flujos piroclásticos, con un espesor total de ~1200 m. Estos depósitos en conjunto le dan una geometría cónica y simétrica (Figuras 3.16 y 3.18). Sobre su estructura lávica, principalmente hacia su base, yacen depósitos de flujos y caídas piroclásticas, producto de erupciones explosivas, ocurridas durante el Pleistoceno tardío, el Holoceno y en la época prehistórica. Asimismo, sobre las lavas se distinguen, depósitos coluviales, lahares y algunas morrenas.

Estas últimas son visibles principalmente al pie de su flanco sur y sureste del volcán.

En base a la distribución de sus depósitos, sus características morfo-estructurales, su estratigrafía y dataciones radiométricas, pensamos que el volcán Yucamane se ha construido en tres periodos (Figura 3.12): "Yucamane I", "Yucamane II" y "Yucamane III". A continuación, se hace una descripción de los depósitos emplazados durante cada uno de los periodos.

3.3.2.1 Yucamane I (PI-Yul): Pleistoceno superior

En este periodo se han emplazado los siguientes depósitos:

- Flujos de lavas (PI-Yul1)

Se trata de flujos de lavas en bloques de composición andesítica y dacítica (58.5 - 64.7 wt.% SiO₂) que conforman la base del volcán Yucamane (Figura 3.18). Los flujos tienen entre 20 y 50 m de espesor individual, mientras que el espesor total de esta secuencia es de aproximadamente

300 m. Cubre una superficie aproximada de 20 km². Estas lavas yacen sobre lavas andesíticas, masivas y densas, atribuidas al volcán Yucamane Chico del Mioceno. Algunos flujos de lava del "Yucamane I" se encuentran parcialmente cubiertos por ceniza y flujos piroclásticos de bloques y cenizas. Estimamos que el emplazamiento de estas lavas fue posterior al emplazamiento de lavas del volcán Calientes, ya que la edad de un flujo de lava de la base del volcán Calientes es de 126 ± 3 ka AP.

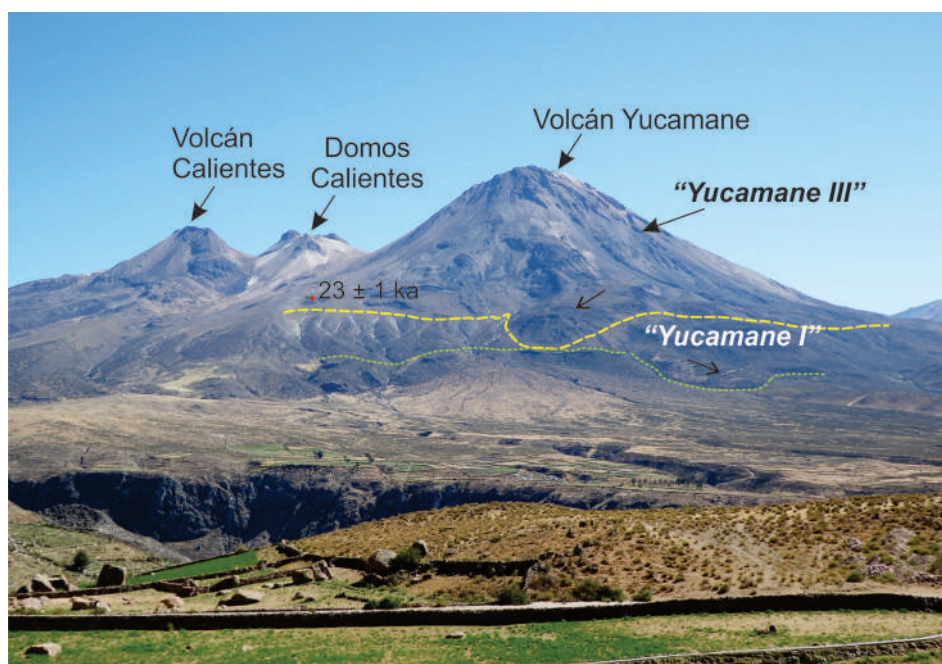


Figura 3.18 Vista del flanco suroeste del volcán Yucamane donde se distinguen las lavas emplazadas durante las etapas "Yucamane I" y el "Yucamane III".

3.3.2.2 Yucamane II (PI-Yull): Pleistoceno superior

En esta segunda etapa denominada "Yucamane II", se produce principalmente el emplazamiento de al menos cuatro depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, de composición andesítica y dacítica, producto del crecimiento y colapso de domos, los cuales afloran en las diversas quebradas que descienden del volcán Yucamane. A continuación, se hace una descripción de los depósitos desde el más antiguo al más reciente.

- Depósito de flujos de bloques y ceniza dacítica "Salado" (PI-Yull1)

En la margen derecha del río Salado (a 7 km al pie del flanco SE del Yucamane), existe una potente secuencia de al menos tres niveles de unidades de flujos piroclásticos

de bloques y ceniza de composición dacítica (Figura 3.19). Estos flujos son masivos, poco endurecidos, de color gris claro y cuyo contacto entre las capas es gradacional. Los bloques juveniles encontrados al interior de las capas son porfíricos, de composición dacítica y contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Cada depósito de flujo mide entre 12 y 18 m de espesor.

El depósito superior de esta secuencia es de similar composición mineralógica y química al depósito de flujo de bloques y ceniza "Salado", de color gris claro, localizado a 9 km al suroeste del volcán Yucamane (al suroeste del poblado de Yucamane Pampa, como se aprecia en la Figura 3.21), en la margen izquierda del río Callazas. Este último depósito sobreyace al depósito de flujo de pómez y ceniza «Basal» del volcán Calientes ("Calientes II"). En



Figura 3.19 Vista de la secuencia de flujos de bloques y ceniza dacíticos visibles en la margen derecha del río Salado, a 7 km al SE del volcán Yucamane.

esta zona, el depósito de flujo está constituido por bloques monolitológicos densos de composición dacítica, de color gris y de textura porfírica, incluidos dentro de una matriz de cenizas. El depósito mide entre 4 a 6 m de espesor. En base a la correlación estratigráfica efectuada en la zona, el depósito de flujo de bloques y ceniza "Salado" estaría infrayaciendo a un depósito de flujos *blast* el cual será descrito a continuación.

- **Depósito de blast andesítico (Pl-Yull2)**

Se ha identificado un depósito de flujo piroclástico tipo *blast* que aflora al suroeste (Figuras 3.20 y 3.21), sur y sureste del volcán Yucamane, y cubre un área de forma lobular, cuyo eje máximo estaría dirigido hacia el suroeste de dicho volcán (Figura 3.22). Este depósito es de color gris, relativamente bien sorteado, no consolidado, y de espesor casi homogéneo (Figura 3.21). Una datación ^{14}C realizada sobre materia orgánica encontrada al interior del depósito de *blast*, en la zona de Pampa Coirire, a 11.3 km del cráter del Yucamane, ha arrojado una edad de 36450 ± 270 ka AP. El depósito presenta una granulometría casi homogénea, es decir, presentan un buen grado de sorteo. Es empobrecido en material fino, con bloques densos de tamaño lapilli, incluidos dentro de una matriz tamaño ceniza gruesa. Los fragmentos juveniles son andesitas porfíricas (62.3 - 62.7

wt.% SiO_2) que contienen fenocristales de plagioclasa (< 1 cm), anfíbol (< 5 mm) y biotita (< 3 mm).

Este depósito aflora en áreas proximales, como en las quebradas Honda y Curancurane, localizadas a menos de 8 km al sur y suroeste del cráter del volcán Yucamane, respectivamente (Figura 3.20), donde mide entre 1.0 y 5.0 m de espesor. En estos afloramientos, los bloques juveniles son densos y miden hasta 40 cm de diámetro. En la quebrada Honda, el depósito de *blast* descansa sobre un depósito de flujo de bloques y ceniza andesítico, no consolidado, y en otros sectores, como la quebrada Curancurane, el depósito de *blast* descansa sobre un depósito de flujo de pómez y ceniza basal, el mismo que aflora en todo el sector de Santa Cruz.

En algunas zonas mediales, por ejemplo, en inmediaciones del poblado de Yucamane Pampa, a 9 km al SO del cráter del Yucamane, el depósito de *blast* descansa sobre la secuencia de flujo de bloques y ceniza "Salado" (Figura 3.21), en cuyo contacto no existe suelo u otro material. A su vez, infrayace al depósito de flujo de bloques y cenizas "Campanani", lo que sugiere que posiblemente este depósito precedería del emplazamiento de un depósito de flujo de bloques y ceniza dacítico.

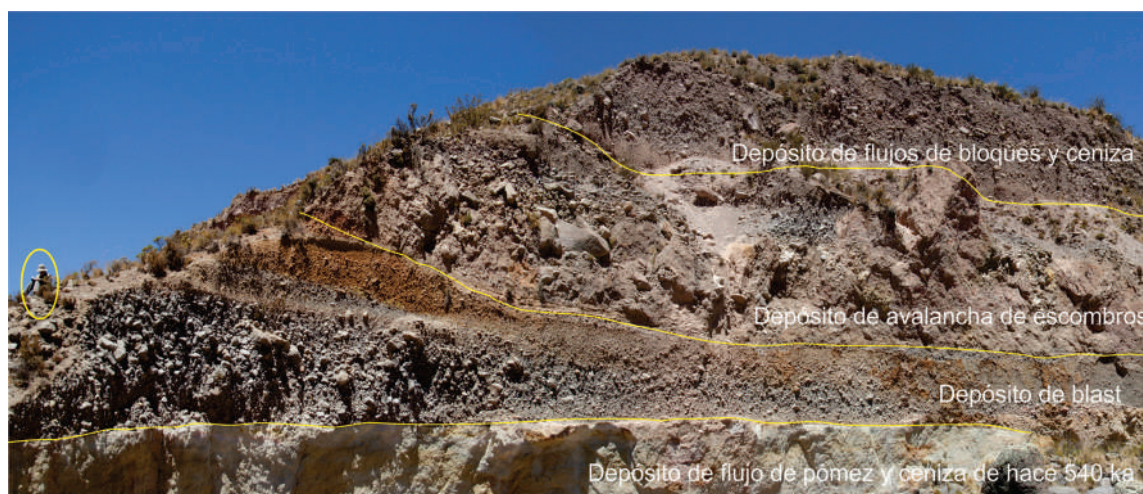


Figura 3.20 Vista del depósito de blast y depósito de avalancha de escombros visible en la quebrada Curancurane.

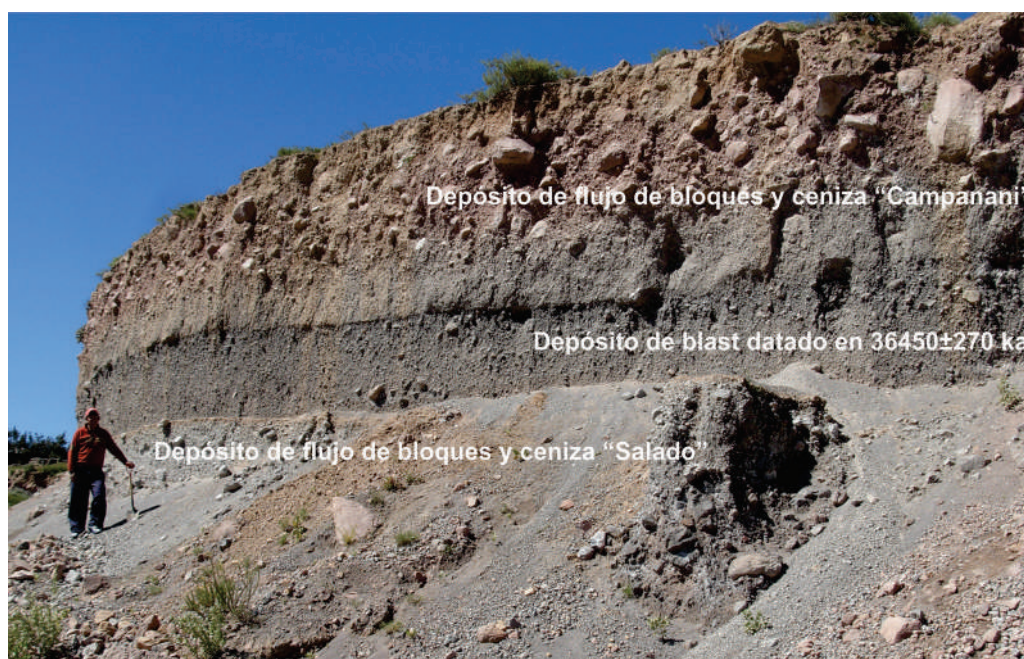


Figura 3.21 Vista del depósito de blast y el depósito de flujo de bloques y ceniza "Campanani" que la sobreyace. Esta secuencia aflora a 9 km al SO del cráter del volcán Yucamane, al suroeste poblado de Yucamane Pampa.

En áreas distales, es decir, a más de 12 km al oeste y suroeste del volcán, como en la pampa Coirire (carretera Candarave-Huaytire) y en la localidad de San Pedro, el depósito de *blast* mide entre 30 a 80 cm de espesor. En esta zona, el depósito engloba algunos bloques juveniles densos,

porfíricos, que miden hasta 12 cm de diámetro. Hay que considerar que el flujo debió atravesar el valle angosto del río Callazas, lo que demostraría que el flujo fue diluido (una característica de depósitos de *blast*).

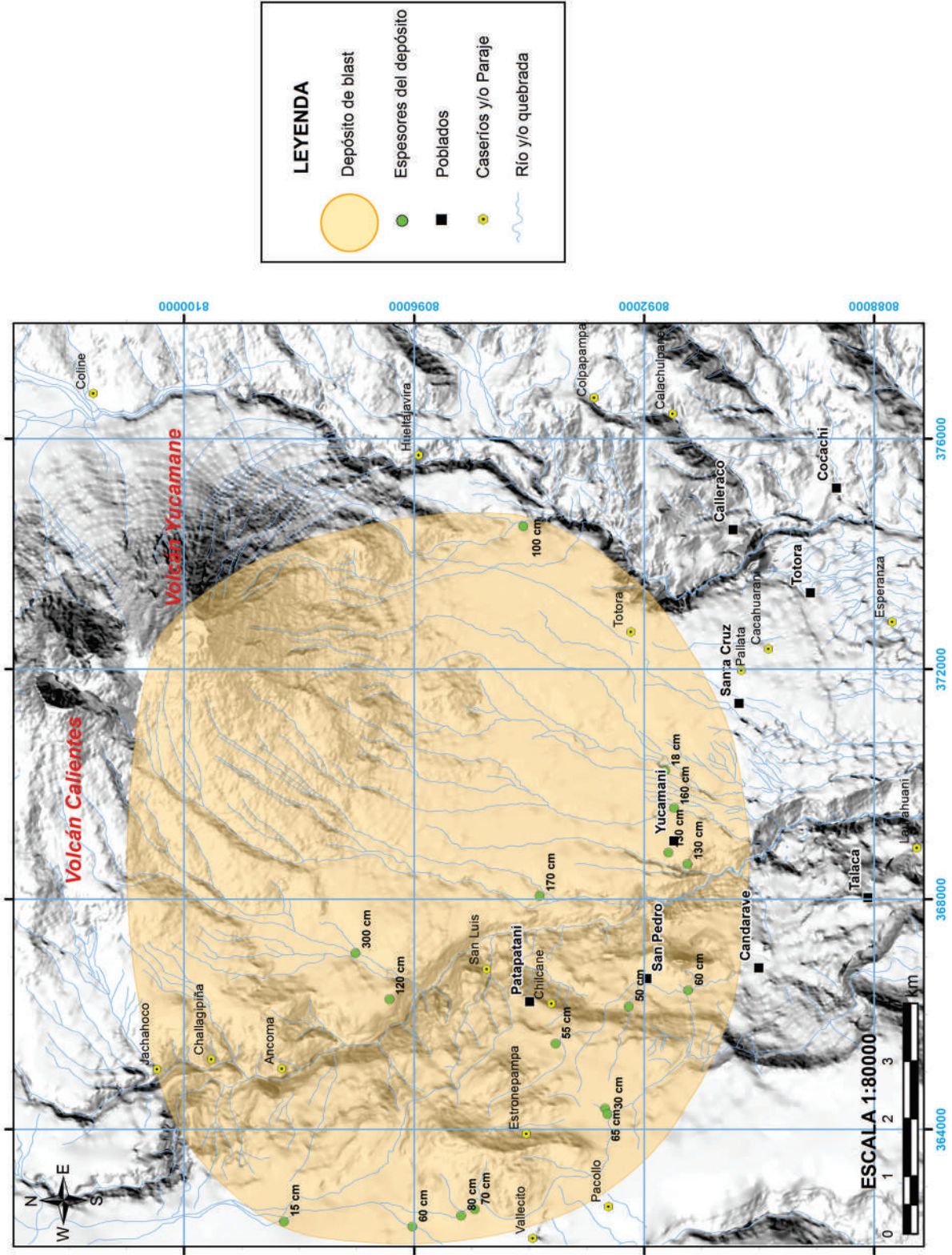


Figura 3.22 Vista del área cubierta por el depósito de blast emplazado hace 36450 ± 250 años AP.

- **Depósito de avalancha de escombros (PI-Yull3)**

Este depósito es observado al pie del flanco sureste del volcán Yucamane, en el sector de Mal Paso, así como en la margen derecha del río Salado (Figura 3.23) y en las inmediaciones del poblado de Santa Cruz y Pampa Pajonal (al sur del volcán Yucamane), donde forma pequeñas colinas

cónicas o *hummocks*. Este depósito de avalancha aflora sobre el depósito de flujo de pómez y ceniza "Basal" emitido por el volcán Calientes hace aproximadamente 540 ± 170 ka. Además, aflora en la quebrada Curancurane, al oeste del volcán Yucamane, en donde sobreyace al depósito de flujos piroclásticos tipo *blast*, descrito anteriormente.



Figura 3.23 Depósito de avalancha de escombros, de facies matriz y bloques soportados, de más de 60 m de espesor que se observa en la zona de Pampa Pajonal-Santa Cruz.

El depósito de avalancha es masivo y poco endurecido. Tiene entre 40 a 60 m de espesor y se encuentra entre 3 y 14 km al sur y sureste del volcán Yucamane. Dicho depósito presenta a veces una facies rica en matriz y otras veces una facies rica en bloques. Esta última es la más frecuente.

El depósito de facies de matriz presenta fragmentos pequeños de rocas lávicas porfiríticas dispersos en una matriz limo-arenosa (Figura 3.23), mientras que el depósito de facies de bloques está conformado por bloques lávicos densos, subangulosos, de composición heterogénea (Fig. 3.24). Algunos son de tamaños métricos, englobados dentro de una matriz arenosa-gravosa. Algunos bloques presentan fracturas tipo *jigsaw* o "dientes de serrucho". También algunos bloques se encuentran oxidados e hidrotermalizados. Algunos son de composición andesítica y de textura porfirítica.

En la margen derecha de la quebrada Curancurane (Figura 3.20), a 6 km al suroeste del volcán Yucamane, se observa el depósito de avalancha de escombros de espesor variable, que mide hasta 8 m de espesor. Este depósito contiene bloques de hasta 3 m de diámetro de rocas lávicas densas, de composición heterogénea, incluidos en una matriz de arena y grava. Los bloques contenidos dentro del depósito están fracturados. El depósito descansa directamente sobre el depósito de *blast* descrito anteriormente.

El origen del depósito de avalancha se debe al colapso del flanco sur del volcán Yucamane, sucedido hace menos de 36 500 años (edad del depósito de *blast*). Esta versión se sustenta en los tipos de fragmentos que se encuentran al interior de dicha avalancha y por su posición estratigráfica que está debajo de los depósitos de flujos de bloques y cenizas emitidos por el volcán Yucamane.



Figura 3.24 Bloques andesíticos con fracturamiento tipo jigsaw o "dientes de serrucho", observados dentro del depósito de avalancha de escombros, en la zona de Pampa Pajonal-Santa Cruz.

- **Depósito de flujo de bloques y ceniza "Campanani"**
(PI-Yull4)

En el curso inferior de la quebrada Campanani, en inmediaciones del poblado de Yucamane Pampa (a 9 km al pie del flanco SO del Yucamane), existe un depósito de flujos piroclásticos de bloques y ceniza de composición dacítica que tiene 5 m de espesor. Este depósito es masivo y poco endurecido, es de color gris claro y se encuentra cubriendo al depósito de *blast* (Figura 3.21 y 3.25). Es necesario mencionar que el contacto entre estos dos depósitos es gradacional.

En esta zona, la base de dicho depósito presenta una concentración de fragmentos líticos lávicos de tamaños

milimétricos, y hacia la parte media del depósito presenta bloques juveniles densos, subredondeados, de hasta 1 m de diámetro. Los bloques juveniles son andesitas (62.5 wt.% SiO₂), de textura porfirítica que contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita.

La unidad "Campanani" aflora en otros sectores proximales del volcán, como en las quebradas que drenan de los flancos sur y suroeste del mismo (Figura 3.26). En estos sectores, este depósito es masivo y mide entre 4 y 8 m de espesor. Al interior de los depósitos se distinguen bloques subangulosos, densos, de textura porfirítica, que tienen hasta 2 m de diámetro.



Figura 3.25 Vista del depósito de blast, cubierto por los depósitos de flujo de bloques y ceniza “Campanani” y “Honda”. Esta secuencia aflora a 9 km al SO del volcán Yucamane, al sur del poblado de Yucamane Pampa.



Figura 3.26 Depósito de flujo de bloques y ceniza “Campanani” de composición andesítica, no consolidado, que yace en el sector de Mal Paso, al pie del flanco sur del volcán Yucamane.

- **Depósito de flujo de bloques y ceniza “Honda” (PI-YullI4)**

En la Quebrada Honda, a 9 km al sur del volcán Yucamane, aflora un potente depósito de flujo de bloques y ceniza de composición dacítica, de 12 m de espesor (Figuras 3.27 y 3.28). El depósito es masivo, poco endurecido y de color gris rojizo. Este depósito yace sobre un delgado depósito de flujo de ceniza poco consolidado, que tiene entre 20 a 40 cm de espesor, el cual sobreyace al depósito de flujos de bloques y ceniza “Campanani”. Este a su vez sobre yace al depósito de *blast* datado en 36450 ± 270 ka. En la parte media y superior del depósito de flujo de bloques y ceniza “Honda”, se distinguen bloques de roca juvenil, densos, que miden hasta 1 m de diámetro, de textura porfirítica, incluidos

dentro de una matriz de ceniza y lapilli. Este depósito es observado además en otras quebradas localizadas al pie del flanco sur del volcán Yucamane, como la quebrada Campanani (Figura 3.25), en donde aflora en el tope de la secuencia piroclástica.

Por su volumen y alcance, esta unidad debió estar asociada a una fase importante de crecimiento y destrucción de domos del volcán Yucamane.

Una correlación estratigráfica de depósitos que afloran en las riberas de las quebradas existentes al pie del flanco SO, S y SE del volcán Yucamane, descritos anteriormente, son presentados en la Figura 3.28.

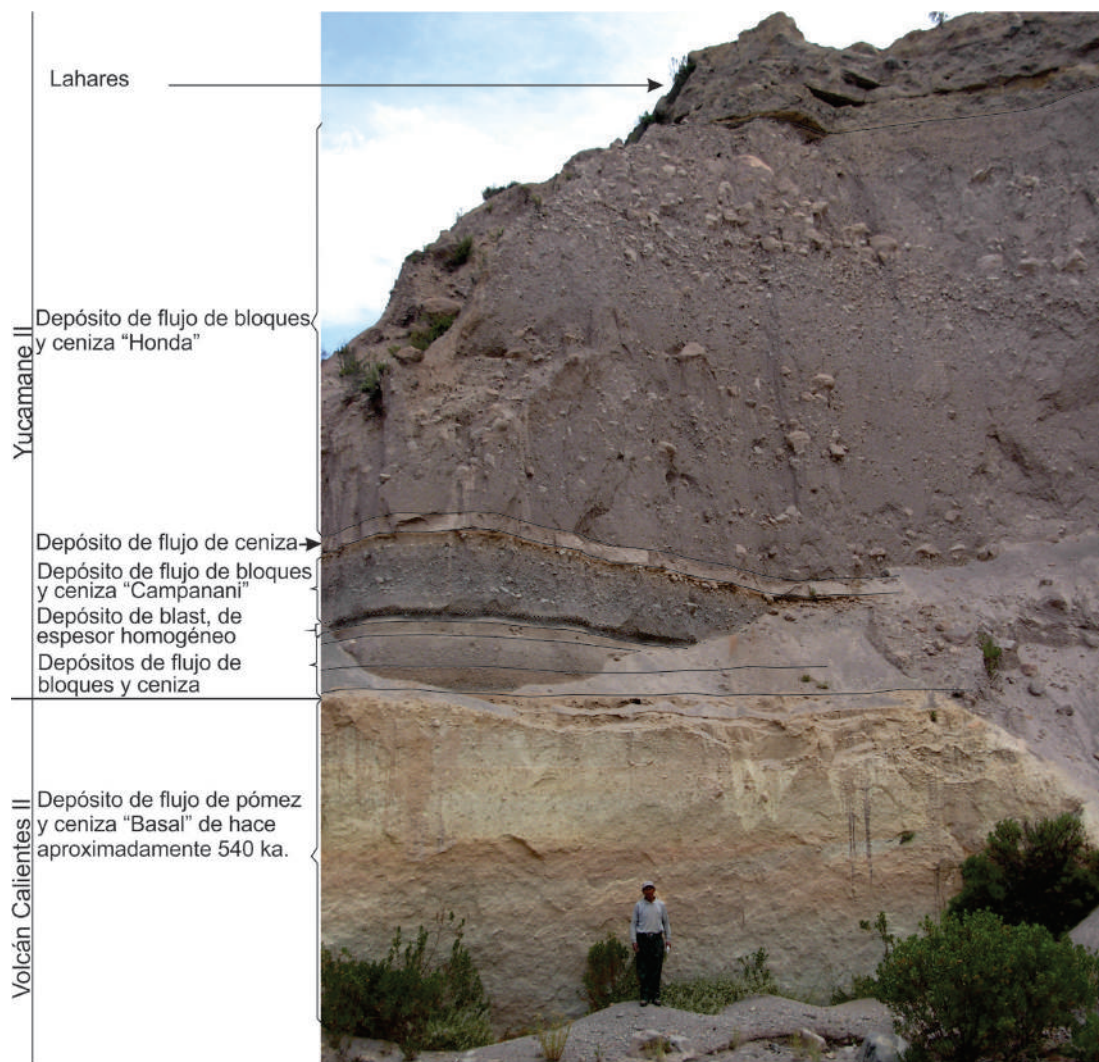


Figura 3.27 Secuencia piroclástica en la quebrada Honda, a 9 km al sur del volcán, donde se distinguen depósitos de flujos de bloques y ceniza no consolidados, que yacen sobre la ignimbrita del volcán Calientes (depósito amarillento).

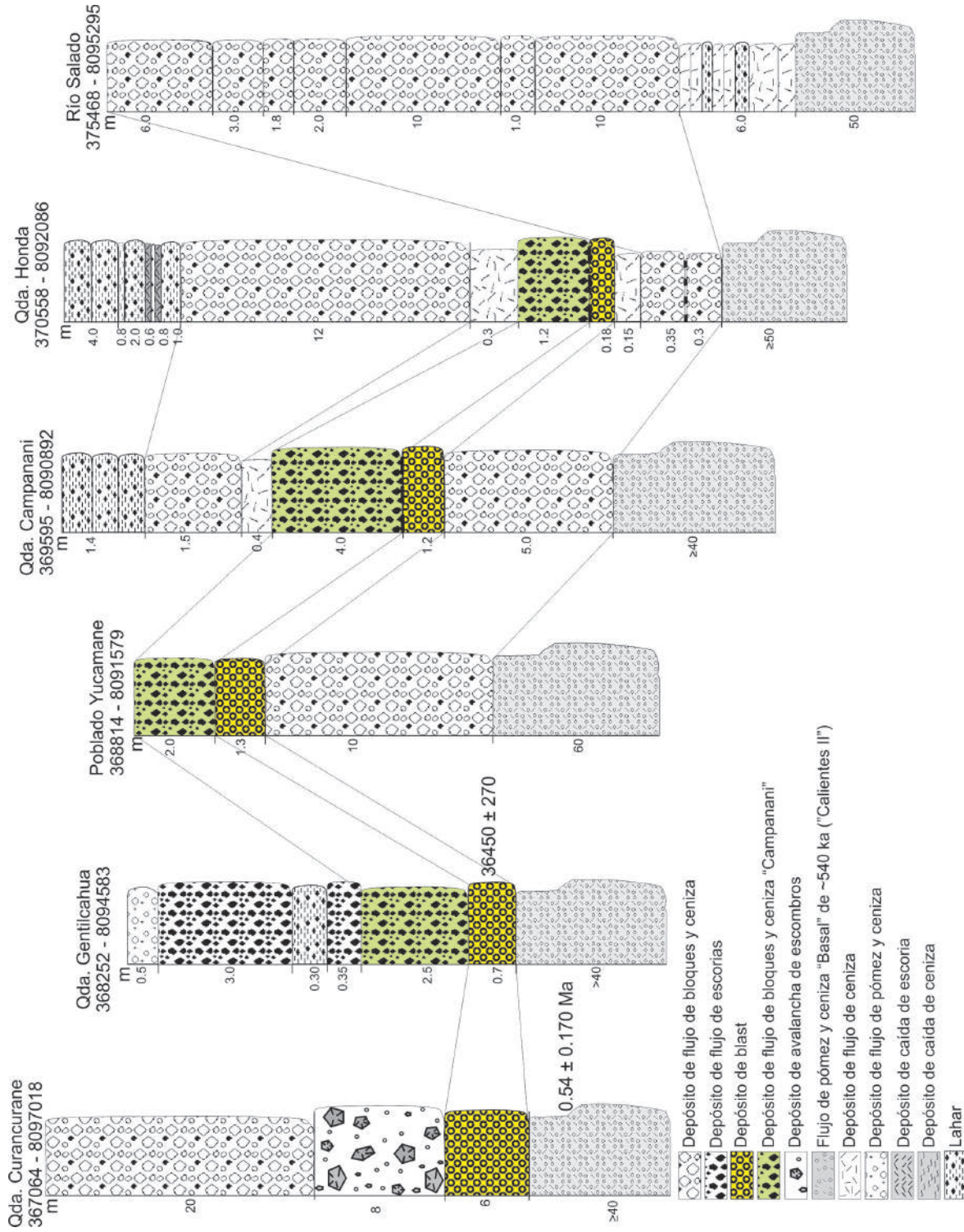


Figura 3.28 Correlación estratigráfica en base a columnas estratigráficas levantadas al SO, S y SE del complejo Yucamane-Calientes.

3.3.2.3 Yucamane III (PI-YuIII): Pleistoceno superior-Holoceno

En una etapa final, luego del reiterado crecimiento y colapso de domos, el Yucamane registra nuevamente una actividad efusiva, seguida o alternada de erupciones explosivas. A continuación, se hace una descripción de los depósitos emplazados en dicho periodo.

- Lavas andesíticas y dacíticas del cono de la cumbre (PI-YuIII1)

Corresponden a flujos de lavas en bloques de composición dacítica y andesítica, localizadas entre los 4300 y 5508 m.s.n.m. Estas lavas conforman el edificio superior del volcán Yucamane (Figura 3.18). Los flujos de lava superpuestos presentan en general pendientes $\geq 40^\circ$ y han recorrido una distancia máxima de 4 a 5 km con dirección radial al cráter. Una lava de la base del cono superior, ubicada al extremo oeste del Yucamane, fue datada en 23 ± 1 ka AP, mientras que otra lava que aflora al pie del flanco SE del Yucamane, fue datada en 3 ± 2 ka AP. Esta última será descrita más adelante.

- Depósitos de flujo de escoria (H-YuIII2)

En los sectores suroeste y sur del volcán Yucamane, yace una secuencia de depósitos de flujo de escorias de

color gris oscuro y marrón oscuro (Figuras 3.29 y 3.30), que en algunos sectores alcanza a medir hasta 10 m de espesor. Las escorias son de composición andesita básica y andesítica (56.7-58.4 wt.% SiO_2), y contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbol, clinopiroxeno, ortopiroxeno y óxidos de Fe-Ti. Estos depósitos se hallan emplazados en paleoquebradas. Estratigráficamente, cubren el depósito de flujo de bloques y ceniza "Campanani" (Figura 3.30) y lavas de la cima del volcán. Se distinguen al menos tres niveles de flujos de escoria en contacto gradacional. El nivel inferior del depósito es rico en líticos lávicos grises de tamaños centimétricos, pero también existen bombas de menos de 10 cm de diámetro. En la parte media y superior del depósito, se distinguen bloques de escorias que miden hasta 60 cm de diámetro. El depósito es masivo y poco o no consolidado. En el tope, se distinguen bombas en forma de coliflor.

El emplazamiento del depósito de flujo de escoria estaría ligado a una gran erupción explosiva, probablemente ocurrida a inicios del Holoceno, ya que cubren parte de la altiplanicie y los depósitos de flujos de bloques y cenizas "Campanani". Sobre este depósito yacen un depósito de lahar rico en pómez y otro depósito de bloques y cenizas gris de 1.7 y 3.0 m de espesor, respectivamente.

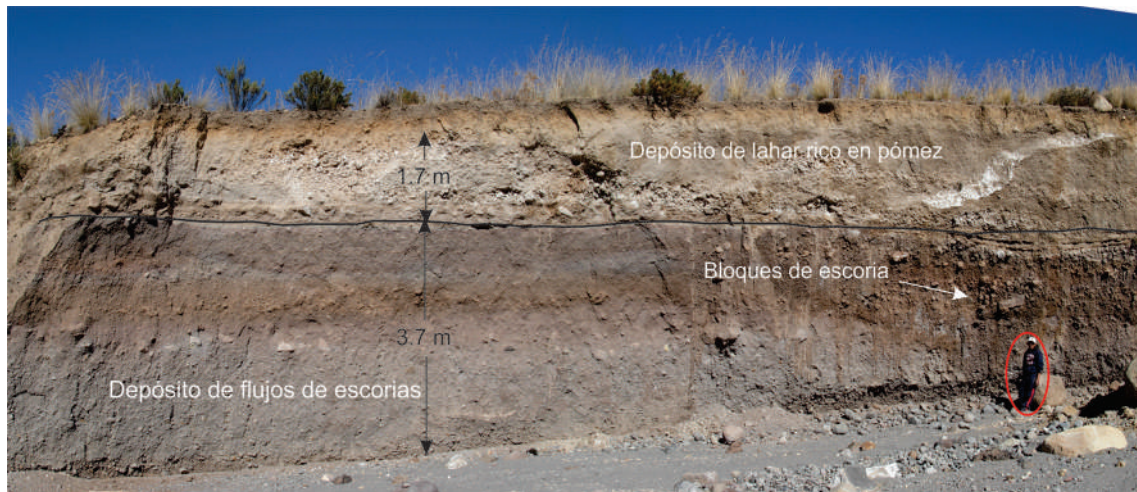


Figura 3.29 Depósito de flujo de escoria que aflora en la margen derecha de una quebrada sin nombre, a 7 km al suroeste del cráter del volcán Yucamane, sobre el cual yace una secuencia de lahares rico en pómez.

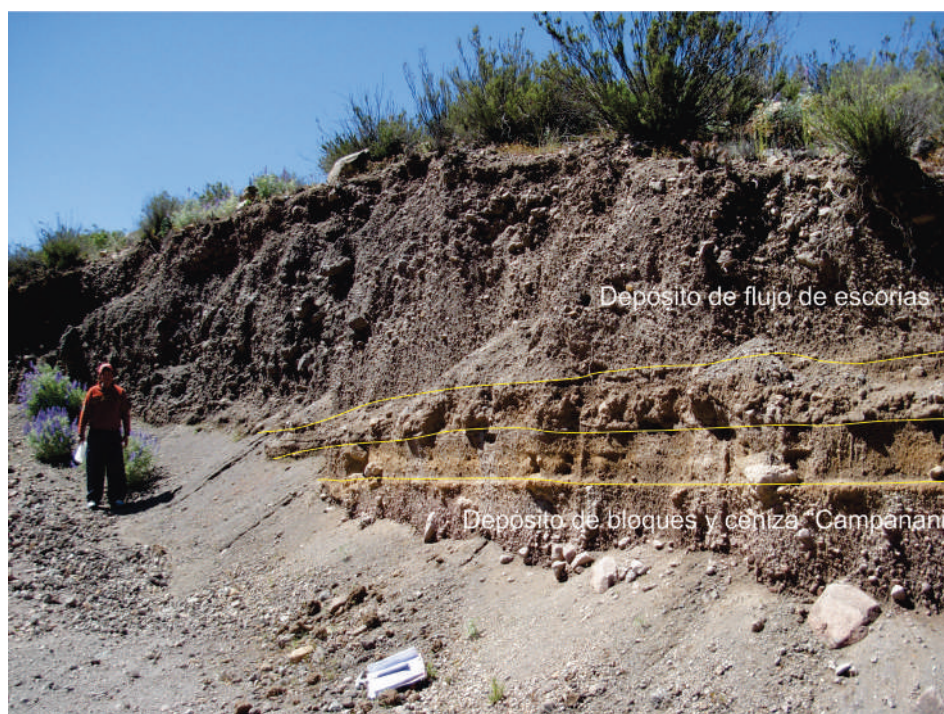


Figura 3.30 Depósito de flujo de escoria visible en la margen izquierda de la quebrada Gentilcahua, a 7 km al suroeste del cráter del volcán Yucamane.

- Depósitos volcanoclásticos (H-YuIII3)

Corresponde a una secuencia estratificada de lahares y flujos hiperconcentrados que afloran al E, SE y SO del volcán Yucamane (Figura 3.31). Se hallan ampliamente distribuidos y forman, en el piedemonte de los volcanes Yucamane y Calientes, pequeños abanicos aluviales. Otras veces hacen parte de terrazas en las quebradas. Los depósitos están dispuestos en capas masivas, consolidadas, y son de color ocre, beige y gris. En total la secuencia mide entre 5 y 12 m de espesor. Algunos niveles presentan concentración de bloques subredondeados. Estos depósitos han quedado al descubierto en las quebradas labradas por las avenidas o corrientes de agua.

- Depósitos de caída de escorias

Se ha identificado tres depósitos de caída de escoria que yacen al pie de los flancos sur y sureste del volcán Yucamane, probablemente emplazados durante el Holoceno (hace más de 3270 años, edad de la última erupción pliniana). Estas capas de escoria tienen entre 8 y 15 cm de espesor, a 4.2 km al sur y sureste del cráter. A continuación, se describe a cada una de ellas.

a) Caída de escoria "Halloween inferior"

Corresponde a un depósito de caída de escoria de color gris oscuro, con una pátina de color anaranjado intenso (Figura 3.32), que aflora en el sector de Mal Paso (4 km al sureste del cráter del Yucamane), donde mide entre 12 y 15 cm de espesor.

En áreas poco más distales, como en el sector de Hueltajavira, a 6 km del cráter, el depósito de caída de escoria "Halloween inferior" mide 10 cm de espesor (Figura 3.33). Según su distribución y los espesores de los depósitos medidos, se infiere que la caída de escoria tuvo un eje de dispersión dirigido hacia el SE (Figura 3.34). El depósito se caracteriza por contener principalmente escorias alteradas y oxidadas de color anaranjado intenso; unas pocas son frescas, de color gris oscuro. Además, el depósito contiene fragmentos líticos lávicos afaníticos y algunos porfiríticos de colores grises. El depósito es masivo y suelto, con ligera granoclasificación inversa. Las escorias miden menos de 4 cm, mientras que los fragmentos líticos miden menos de 3.5 cm. La proporción volumétrica es la siguiente: ~60% de escorias y ~40% de fragmentos líticos. Las escorias son de composición andesítica y contienen fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol.



Figura 3.31 Depósitos volcanoclásticos visibles en el sector de Mal Paso, a 7 km al sureste del cráter del volcán Yucamane.



Figura 3.32 Depósito de caída de escoria "Halloween inferior" que aflora en el sector de Mal Paso, a 4 km al sur del cráter, donde mide 15 cm de espesor.



Figura 3.33 Depósito de caída de escoria "Halloween inferior" y "Halloween superior" que aflora en el sector de Hueltajavira, a 6 km al sureste del cráter, donde mide 10 cm de espesor.

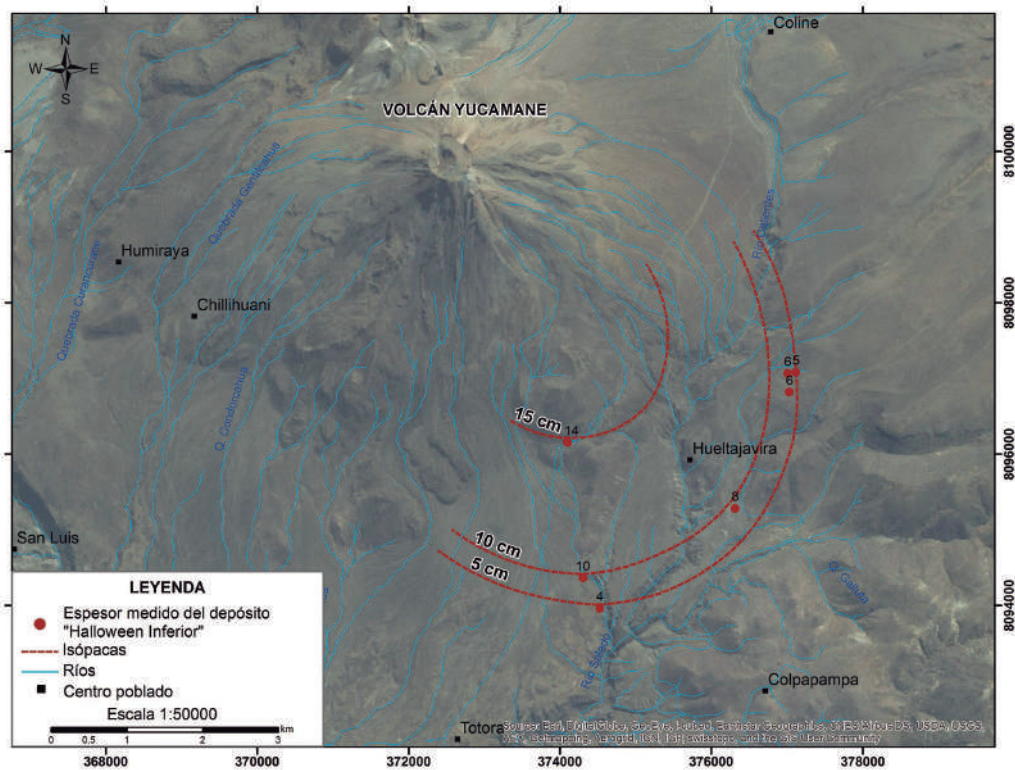


Figura 3.34 Mapa de isópacas de la caída "Halloween inferior"

b) Caída de escoria “Parda”

Corresponde a un depósito de caída de escorias que aflora al pie del sector Mal Paso, a 4 km al sureste del cráter del volcán Yucamane, donde mide entre 16 y 18 cm de espesor (Figura 3.35). Asimismo, aflora en la quebrada Honda, a 9 km al sur del volcán, en medio de una secuencia de depósitos de lahares, cuya edad es probablemente Holocénica. Este depósito de caída aflora sobre el depósito de caída de escoria “Halloween inferior”, descrita anteriormente.

Las escorias son de color gris, con patinas de color verde oliva a parda, y miden menos de 3 cm de diámetro. Las escorias predominan principalmente en el medio del depósito. En la base y el tope del depósito, predominan

fragmentos líticos lávicos grises de tamaños milimétricos (<1 cm). Además, el depósito contiene considerable porcentaje de fragmentos líticos afaníticos oxidados y algunos no oxidados (grises). En la base presenta una ligera gradación inversa y en el tope presentan una ligera gradación normal. La proporción volumétrica de escorias es ~50%, al igual que de los fragmentos líticos (~50%). Las escorias son de composición andesítica y contienen fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol. Los fragmentos líticos miden menos de 3 cm, estos son poco porfíricos y afaníticos.

Según su modo de distribución, la caída “parda” tuvo un eje de dispersión hacia el SE del volcán Yucamane (Figura 3.36).

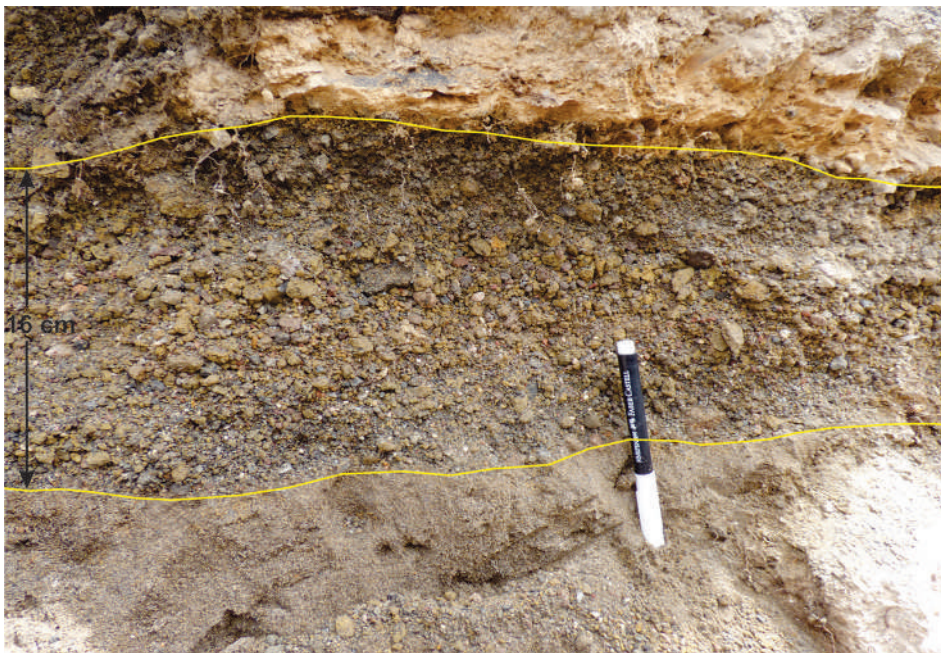


Figura 3.35 Depósito de caída de escoria “Parda” que aflora en el sector de Mal Paso, a 4 km al sur del cráter, donde mide 16 cm de espesor.

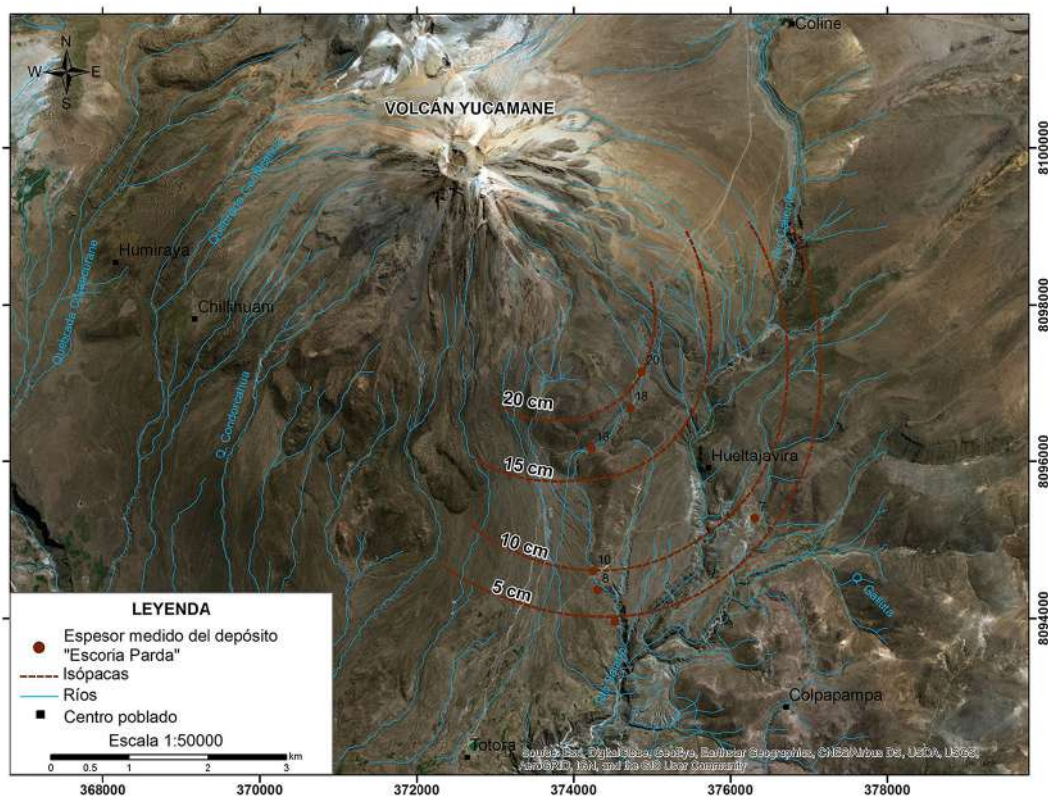


Figura 3.36 Mapa de isópacas de la caída de escoria "Parda".

c) Caída de escoria "Halloween superior"

Es un depósito de caída de escoria marrón, con una patina anaranjada tenue, que aflora al pie del sector de Mal Paso (4 km al sureste del cráter del volcán Yucamane), donde mide entre 12 y 22 cm de espesor (Figuras 3.33 y 3.37). Este depósito aflora sobre el depósito de caída de escoria "Parda", descrita anteriormente (Figuras 3.35 y 3.38). Se caracteriza por contener escorias alteradas y oxidadas con patina anaranjada que abundan en la parte inferior y media del depósito. Algunas escorias son relativamente frescas. El depósito en la base presenta un ligera gradación inversa, mientras que en el tope abundan fragmentos líticos lávicos grises de tamaños centimétricos y milimétricos (Figura 3.37). El tope del depósito presenta una ligera gradación normal. Las escorias miden menos de 4 cm, mientras que los fragmentos líticos miden menos de 3 cm. En el depósito, las escorias están entre 60-70 %,

mientras que los fragmentos líticos están entre 30-40%. Las escorias son poco vesiculadas y de composición andesítica; estas contienen fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol.

Dada la extensión del área cubierta por el depósito "Halloween superior", así como los espesores medidos de este depósito de caída de escorias, se asume que fue generado durante una actividad explosiva de tipo subpliniano. Según su modo de distribución, la caída "Halloween superior" tuvo un eje de dispersión hacia el SE del volcán Yucamane.

La correlación estratigráfica realizada en base a datos de campo (Figura 3.38) muestra que los depósitos de caídas de escorias son poco frecuentes en la actividad eruptiva del volcán Yucamane. Estas se depositaron principalmente durante el Holoceno y hace menos de 3270 años AP (edad de la última erupción subpliniana de dicho volcán).

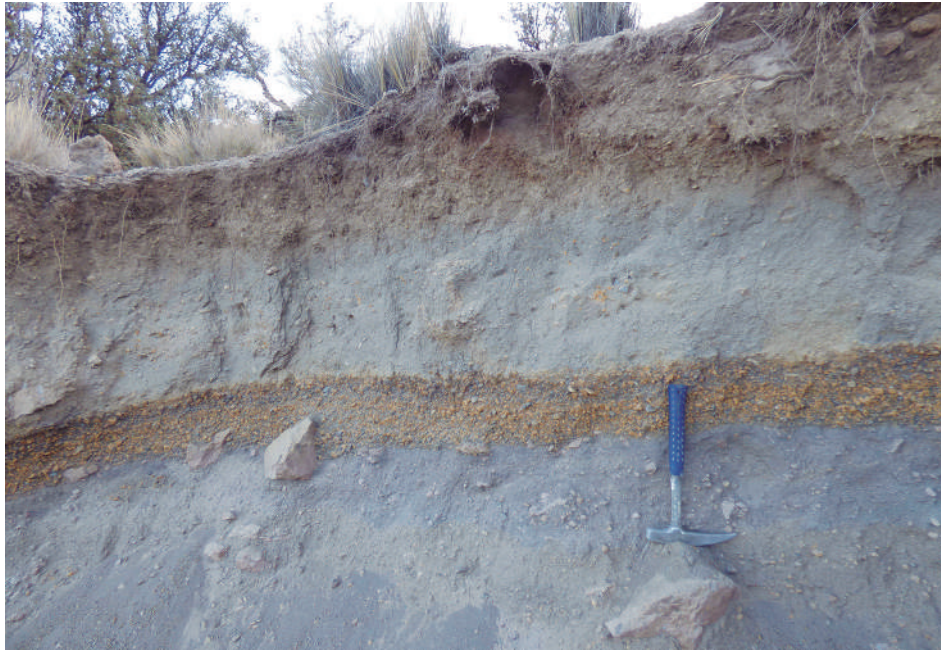


Figura 3.37 Depósito de caída de escoria "Halloween superior" que aflora al pie del sector Mal Paso, a 4 km al sur del cráter, donde mide 12 cm de espesor.

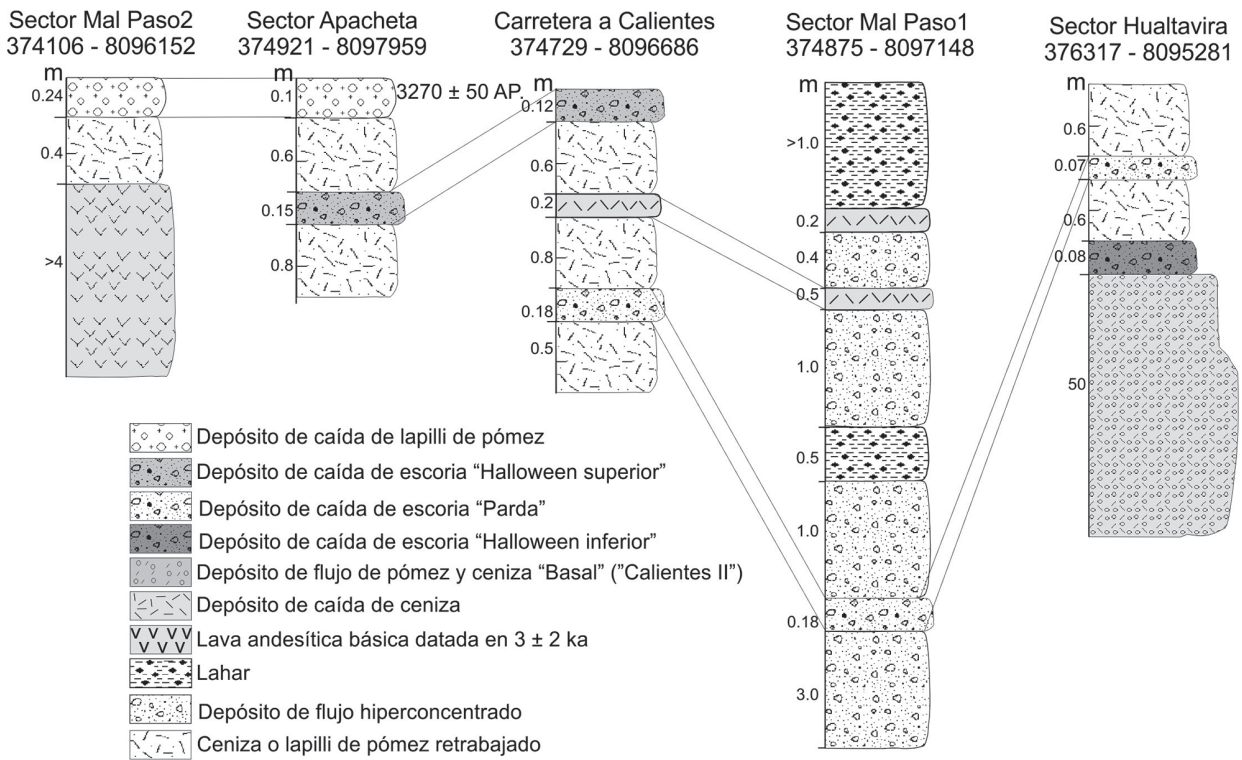


Figura 3.38 Correlación estratigráfica en base a columnas estratigráficas levantadas al E y SE del volcán Yucamane.

- **Lavas andesíticas recientes del Yucamane (H-Yulll4)**

Corresponden a flujos de lavas en bloques de composición andesítica básica (55.2-56.4 wt.% SiO₂), que afloran al pie del flanco SE del volcán Yucamane, entre 3400 y 3800 m s. n. m., al extremo norte del sector Mal Paso. Estas lavas presentan en general pendientes $\geq 15^\circ$ y han recorrido una

distancia máxima de 4.2 km desde la cumbre, con dirección SE del cráter. Una lava que aflora al pie del flanco SE del Yucamane fue datada en **3 ± 2 ka AP** (Figura 3.39).

Las lavas están cubiertas por el depósito de caída de lapilli de pómez de la erupción de hace 3270 años AP, la cual será descrita a continuación.



Figura 3.39 Flujo de lava andesítica datada en 3 ± 2 ka, que yace a 4 km al sureste del volcán Yucamane.

- **Depósito de caída de lapilli de pómez de hace 3270 años AP. (H-Yulll5a)**

Al pie del flanco este y sureste del volcán Yucamane (Figuras 3.40 y 3.41) y sobre la altiplanicie volcánica aflora un depósito de caída de lapilli de pómez que contiene alta concentración de fragmentos líticos alterados e hidrotermalizados. Las pómez son gris amarillentas y miden hasta 12 cm de diámetro, mientras que los fragmentos líticos lávicos son grises y rojizos, y miden menos de 6 cm de diámetro. Las pómez son de composición andesítica (62.7 wt% SiO₂) y contienen fenocristales de plagioclasa (<0.4 cm), anfíbol (<0.3 cm), biotita (<0.4 cm) y piroxeno (<0.1 cm). El depósito mide entre 45 y 50 cm de espesor (de 2.5 a 4 km de distancia del cráter); tuvo probablemente un eje de dispersión dirigido al SE, visible hasta una distancia de 10 km desde el cráter (Figura 3.42). Es uno de los depósitos más recientes de caída de lapilli de pómez del Yucamane,

cuyo volumen es $< 0.01 \text{ km}^3$ (Vela, 2015). La datación C¹⁴ de una muestra de carbón encontrada en la base de este depósito arrojó una edad de **3270 ± 50 años AP**. Asociada a dicha erupción, se emplazó un depósito de flujo de pómez y ceniza, el cual será descrito más adelante.

Los espesores del depósito de caída de lapilli de pómez son variables. A 2 km de distancia del cráter mide 50 cm y a 9 km mide 5 cm (Figura 3.42).

El tamaño de las pómez es variable, alcanzan a medir entre 6 a 6.8 cm de diámetro a 2 km de distancia del cráter. En áreas más distales a 9 km del cráter, alcanzan a medir hasta 2.5 cm de diámetro (Figura 3.43).

El tamaño de los fragmentos líticos es variable. Alcanzan a medir hasta 6 cm de diámetro a 2 km de distancia del cráter. En áreas más distales, a 9 km del cráter, alcanzan a medir hasta 1.5 cm de diámetro (Figura 3.44).



Figura 3.40 Depósito de caída de lapilli de pómez de hace 3270 ± 50 años AP, que aflora al pie del flanco este del volcán Yucamane.



Figura 3.41 Vista del depósito de caída de lapilli de pómez de hace 3270 ± 50 años AP, que está cubriendo lavas andesíticas básicas de hace 3 ± 2 ka en el pie del flanco sureste del volcán Yucamane (sector Mal Paso).

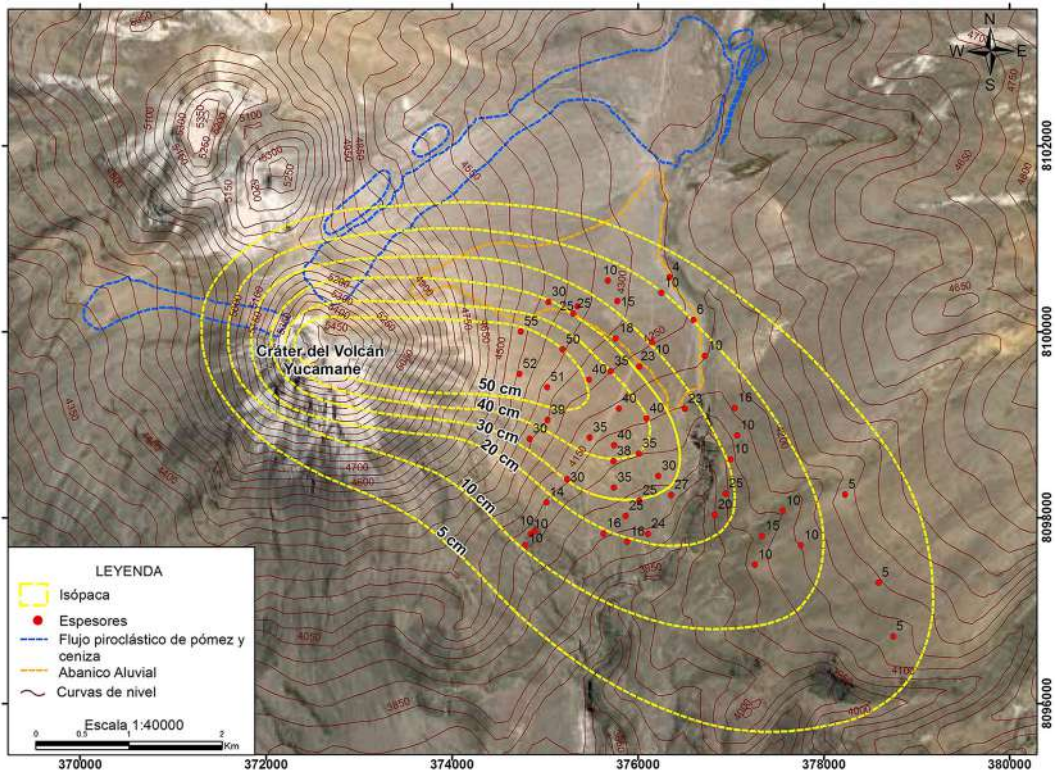


Figura 3.42 Mapa de isópacas de la caída de lapilli de pómez de hace 3270 ± 50 años y área cubierta por flujos de pómez asociados (tomado de Vela, 2015).

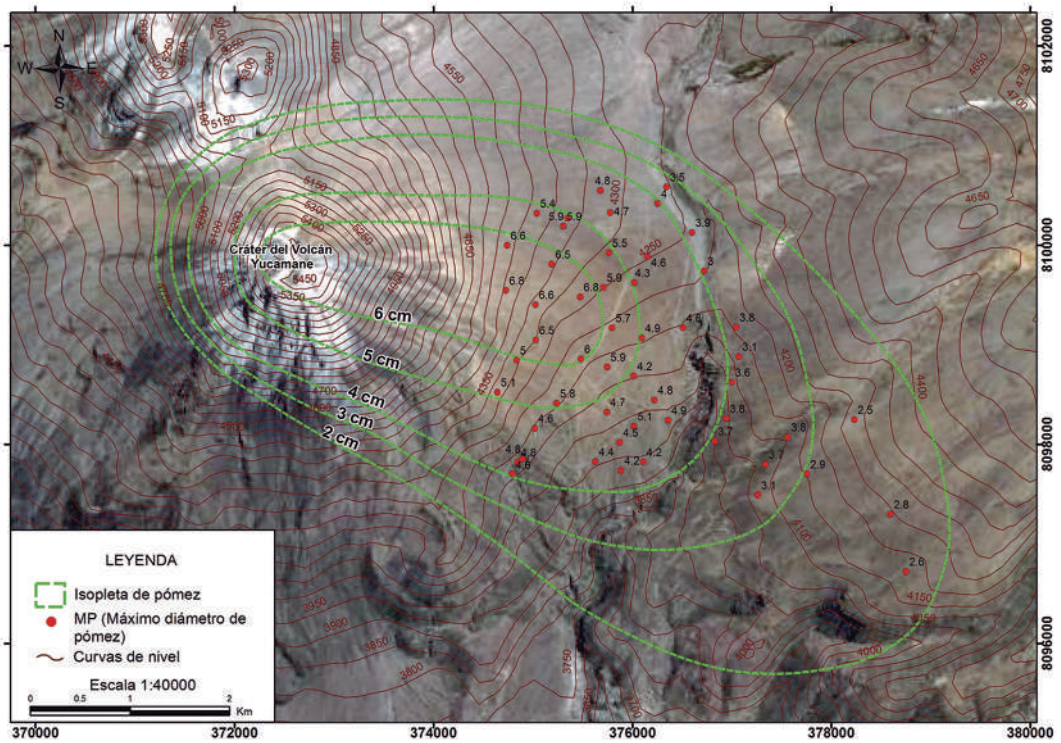


Figura 3.43 Mapa de isopletas de pómez de la erupción de hace 3270 ± 50 años (tomado de Vela, 2015).

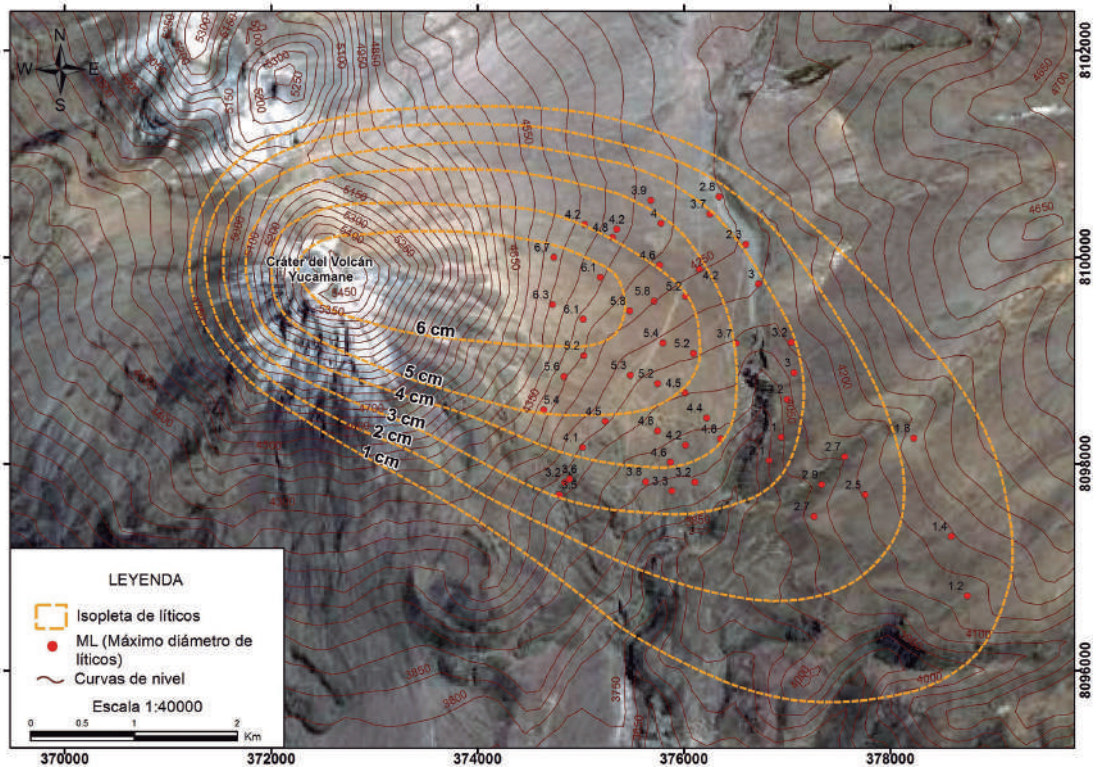


Figura 3.44 Mapa de isoplethas de líticos de la erupción de hace 3270 ± 50 años (tomado de Vela, 2015).

- **Depósito de flujo piroclástico de hace 3270 años AP. (H-YuIII5b)**

Al pie del flanco noreste del volcán Yucamane, en una zona de abanico y altiplanicie, se distingue una secuencia de flujo de pómez y ceniza asignada a la erupción de hace 3270 años AP. Este depósito aflora sobre el depósito de caída de lapilli de pómez, visible en la Pampa Cambaya, al Este del volcán Yucamane.

El depósito de flujo de pómez y ceniza es poco consolidado y alcanza a medir hasta 7 m de espesor, a 5 km al noreste del cráter del volcán Yucamane (Figura 3.45). El depósito presenta al menos tres niveles bien diferenciados. En la base, se distingue un nivel de flujo de pómez rojizo y a veces amarillento, con pómez de tamaños centimétricos,

ligeramente hidrotermalizados. En la parte media, se distingue un nivel de flujo de pómez y ceniza gris, con poca matriz, cuyas pómez miden hasta 1 m de diámetro. En el tope, se distingue un nivel de flujo de pómez y ceniza con mayor contenido de matriz constituida de ceniza. En este nivel, las pómez miden poco menos de 30 cm de diámetro.

A diferencia de las pómez de caída, en el depósito de flujo de pómez y ceniza se distinguen algunas pómez bandeadas, cuyas bandas son gris claras y gris oscuras. Las bandas claras son de composición dacítica ($64.3 \text{ wt.} \% \text{ SiO}_2$), mientras que las bandas oscuras son de composición andesítica ($62.0 \text{ wt.} \% \text{ SiO}_2$). En general, las pómez contienen fenocristales de plagioclasa, biotita, piroxeno y anfíbol; son poco densas y algunas tienen estructuras de "corteza de pan".



Figura 3.45 Vista del depósito de flujo de pómez y ceniza de hace 3270 ± 50 años AP, que aflora al pie del flanco noreste del volcán Yucamane.

3.4 OTROS DEPÓSITOS

- Lahares (Qh-l)

Lahares de diversos espesores (1 a 4 m) se hallan intercalados entre los depósitos de flujos piroclásticos, y a veces yacen en la parte superior de las secuencias volcánicas que afloran en los alrededores del volcán Yucamane. Estos lahares son masivos, en su mayoría algo consolidados y de colores gris a marrón. Otros lahares se hallan canalizados en las quebradas ubicadas al pie de los flancos sur, sureste y suroeste del volcán Yucamane (Qda. Honda, Campanani, Gentilcahua, Queñua, etc.). Están conformados principalmente por bloques lávicos englobados en una matriz areno-limosa (Figura 3.27). Se originaron en periodos de lluvias fuertes y por el agua proveniente del deshielo de la nieve y hielo que permanece en la cumbre del volcán. Los afloramientos poseen entre 1 y 3 m de espesor.

- Depósitos morrénicos (Pl-Mo/H-Mo)

Se distinguen morrenas laterales en el flanco oeste, este y sur del volcán Yucamane (Figura 2.9), así como al pie del flanco suroeste del volcán Calientes. Se hallan conformadas por bloques de lava de naturaleza polimíctica y de diverso tamaño, incluidos dentro de una matriz areno-limosa a arenosa. Por su posición (entre los 4000 y 4500 m s. n. m.)

y sus características morfológicas, se trata de morrenas emplazadas durante las glaciaciones del Pleistoceno tardío y Holoceno.

- Depósitos coluviales (Qh-CI)

Están conformados por una mezcla de bloques angulosos, heterogéneos y heterométricos, con materiales finos (arenas y limos), que generalmente se presentan muy sueltos y forman escombreras. Existen depósitos considerables en las laderas de los volcanes Calientes y Yucamane Chico, aunque también concurren depósitos pequeños en los flancos del volcán Yucamane (Figura 2.1).

- Depósitos aluviales (Qh-AI)

Se emplazan en la parte sur del área de estudio, en ambas márgenes de los lechos de los ríos Jaruma y Callazas, cerca de la laguna Aricota. Están conformados por niveles de arenas, limolitas y niveles de bloques de lava y grava, englobados dentro de una matriz areno-limosa. Dichos depósitos son sueltos y están interestratificados.

3.5 ERUPCIONES HISTÓRICAS

Archivos o documentos sobre la actividad del volcán Yucamane ocurrida en los últimos siglos son escasos y a la vez contradictorios. Dean Valdivia, en *Fragmentos para la Historia*

de Arequipa (Folletín de "El Deber", Arequipa, 1956, considera a Candarave como anexo de llabaya, erigido en curato en 1776 por el Monseñor Abad Yllana, quién lo describe así: "Es frío y produce alfalfa. A su cabeza se halla el volcán Yucamani, corpulenta y que humea y reventó en parte en 1787".

Por otro lado, en el libro de Volcanes del Mundo (Siebert et al., 2011), se reportan varias posibles erupciones del volcán Yucamane ocurridas en los años AD 1320, 1780, 1787, 1802, 1862 y 1902. Según estudios recientes, al menos las erupciones ocurridas en los años 1780, 1787 y 1802 estarían ligadas a la actividad del volcán Tutupaca, localizado a 24 km al noroeste del volcán Yucamane. En efecto, trabajos recientes realizados en el volcán Tutupaca (Samaniego et al., 2015) muestran que este volcán presentó una serie de erupciones en tiempos históricos, que incluyen depósitos de flujos de colapso de domo, así como un colapso sectorial, con el consecuente emplazamiento de una avalancha de escombros y una muy importante secuencia de

flujos piroclásticos que acompaña a la avalancha. En base a 5 dataciones por radiocarbono, Samaniego et al. (2015) estimaron que la edad promedio de esta secuencia de eventos es de 218 ± 14 año BP, lo que concuerda perfectamente con las crónicas de Zamacola y Jauregui (1804) y Dean Valdivia (1956), que describen varias erupciones del Tutupaca en el siglo XVIII (1787-1802 AD).

Las fechas de las erupciones ocurridas en los años 1320, 1862 y 1902 son dudosas, puesto que según nuestros estudios geológicos, una de las últimas erupciones presentadas por el volcán Yucamane ocurrió hace 3270 años AP, aproximadamente.

Actualmente, el volcán Yucamane no manifiesta actividad fumarólica alguna. Sin embargo, en su extremo NE del complejo volcánico Yucamane, hay importante campo geotermal denominado Calientes, con temperaturas que varían entre 20 y 86°C y es considerado el campo geotermal más importante del país.

CAPÍTULO IV

PETROGRAFÍA DE PRODUCTOS VOLCÁNICOS

Durante los años 2012, 2013 y 2014 se recolectaron 78 muestras de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes (Figura 4.1) para el estudio petrográfico, mineralógico y geoquímico.

Este muestreo representa los diferentes depósitos volcánicos emitidos en las diferentes etapas del Complejo Volcánico Yucamane Calientes. A continuación, se presenta una descripción detallada de las rocas provenientes de cada edificio volcánico, con el fin de realizar una discriminación y determinar si las rocas presentan características similares o no.

4.1 VOLCÁN YUCAMANE CHICO

4.1.1 Andesitas

Estas rocas corresponden a flujos de lava de color gris (Yu: 12-22, 12-34, 12-58); son densas y poco o no vesiculares. Estas rocas están constituidas de fenocristales de plagioclasa, anfíbol, óxidos de Fe-Ti y a veces de ortopiroxeno y clinopiroxeno. Estas rocas presentan fenocristales de plagioclasa de hasta 1 mm con hábitos subhedrales y euhedrales (10-30 vol.%). Algunos cristales muestran texturas *sieve (en tamiz)* en los contornos. Asimismo se distinguen microcristales de plagioclasa en la pasta (Figura 4.2). Los anfíboles son de formas alargadas y miden hasta 1 mm. Algunos presentan bordes de oxidación y otros están parcial o completamente remplazados por óxidos. Los ortopiroxenos son subhedrales y miden hasta 750 µm. Frecuentemente, se distinguen aglomerados de fenocristales de ortopiroxeno, clinopiroxeno, plagioclasa y óxidos de Fe-Ti.

4.1.2 Dacitas

Estas rocas corresponden principalmente a un domo de lava (Yu-12-40). Estas rocas están constituidas por fenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbol y óxidos de Fe-Ti. Los fenocristales de plagioclasa (5-30 vol. %) miden hasta 4 mm. Estas tienen hábitos euhedrales y subhedrales. Algunos tienen textura «en tamiz», mientras que otros presentan caras sin alteración o sin fracturamiento interno. La biotita (6-8 vol.%) de hábito euhedral y subhedral está en tamaños <2 mm. Algunos contienen inclusiones de microlitos de plagioclasa y óxidos de Fe y Ti (Figura 4.3). El anfíbol de hábito euhedral y subhedral están en tamaños <3 mm. Algunos presentan delgados bordes de óxidos.

Se distingue una pasta constituida de un vidrio oscuro compuesto por pocos microcristales de plagioclasa, anfíbol y biotita.

4.2 VOLCÁN CALIENTES

4.2.1 Andesitas

Estas rocas corresponden a flujos de lava (Yu: 12-20, 12-31, 12-33, 12-42, 12-43, 12-44, 12-48, 12-50, 12-51, Yu-17) (Figura 4.4). Estas rocas son masivas y de colores gris claro y gris oscuro. Presentan texturas porfíricas con una matriz de tipo intersertal o vítrea. Estas rocas están constituidas de fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita, óxidos de Fe-Ti y a veces de ortopiroxeno y clinopiroxeno. Los fenocristales de plagioclasa miden hasta 7 mm y tienen hábitos subhedrales y euhedrales. Se distinguen tres familias de cristales de plagioclasa: microlitos menores de 100 µm dispersos en la pasta, microcristales que tienen entre 100 a 250 µm y fenocristales grandes que miden hasta 7 mm. Los anfíboles presentan hábitos alargados y miden hasta 2 mm. Algunos presentan bordes de oxidación. Los ortopiroxenos son subhedrales y miden hasta 750 µm. Las biotitas son subhedrales y a veces presentan vesículas de formas irregulares. A veces, en las muestras, se distinguen aglomerados de fenocristales de ortopiroxeno, clinopiroxeno, plagioclasa y óxidos de Fe-Ti.

4.2.2 Dacitas

Las rocas de composición dacítica se presentan en gran proporción en el volcán Calientes (50-60 % en volumen). Corresponden principalmente a flujos de lava (Yu: 12-30, 12-39, 12-41, 12-45, 12-46, Yu-24), depósitos de flujos de pómez y ceniza (Yu-12-09; 12-62; 12-63; 12-77) y domos de lava (Yu-12-47). Estas rocas están constituidas de fenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbol, óxidos de Fe-Ti y a veces de ortopiroxeno y clinopiroxeno.

Los fenocristales de plagioclasa (25-30 vol. %) miden menos de 3 mm, y tienen hábitos euhedrales y subhedrales. Algunos fenocristales presentan textura «en tamiz», mientras que otros presentan caras sin alteración o sin fracturamiento interno; a veces contienen inclusiones de microcristales de clinopiroxeno y biotita.

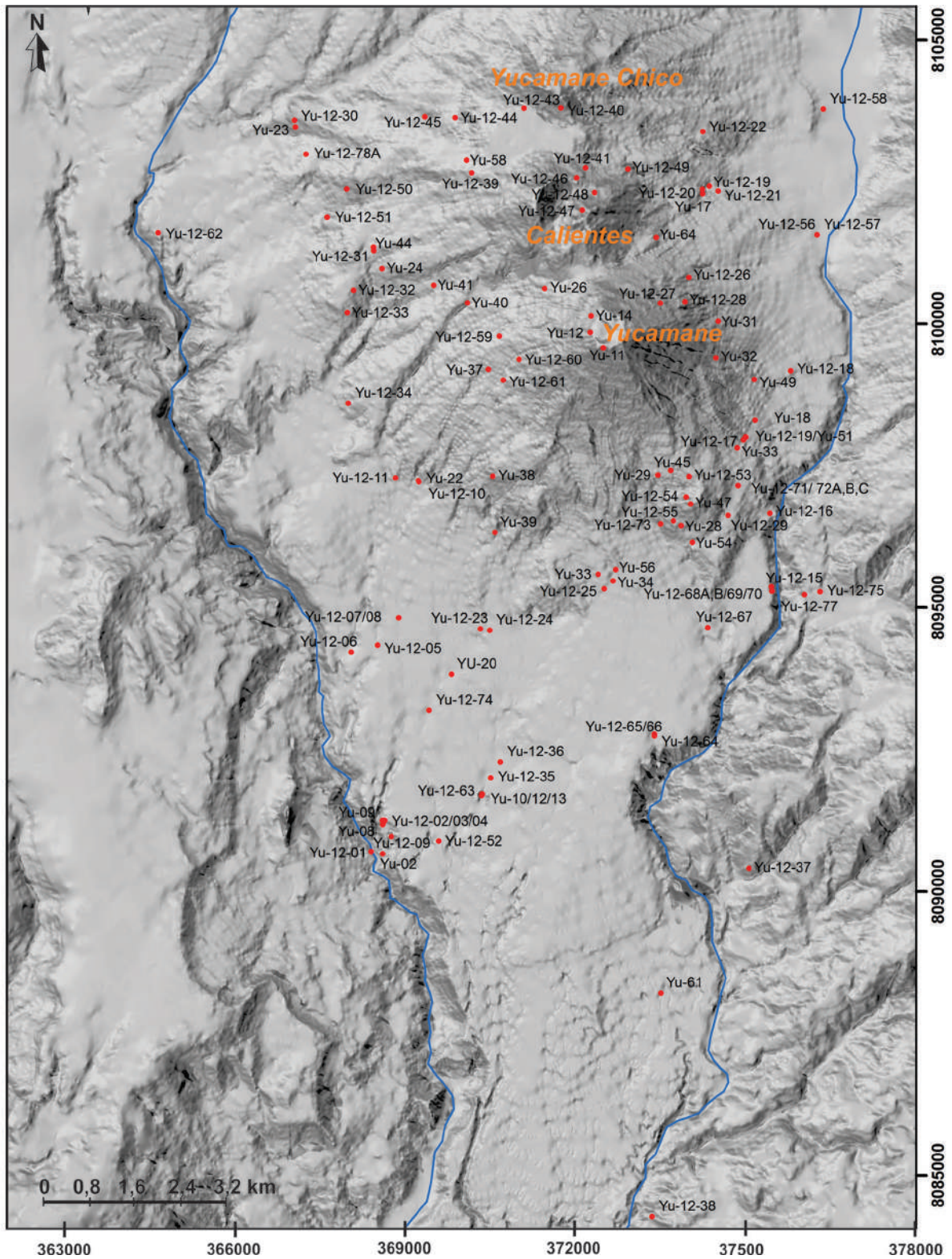


Figura 4.1 Mapa de ubicación de muestras recolectadas en el complejo volcánico Yucamane-Calientes.

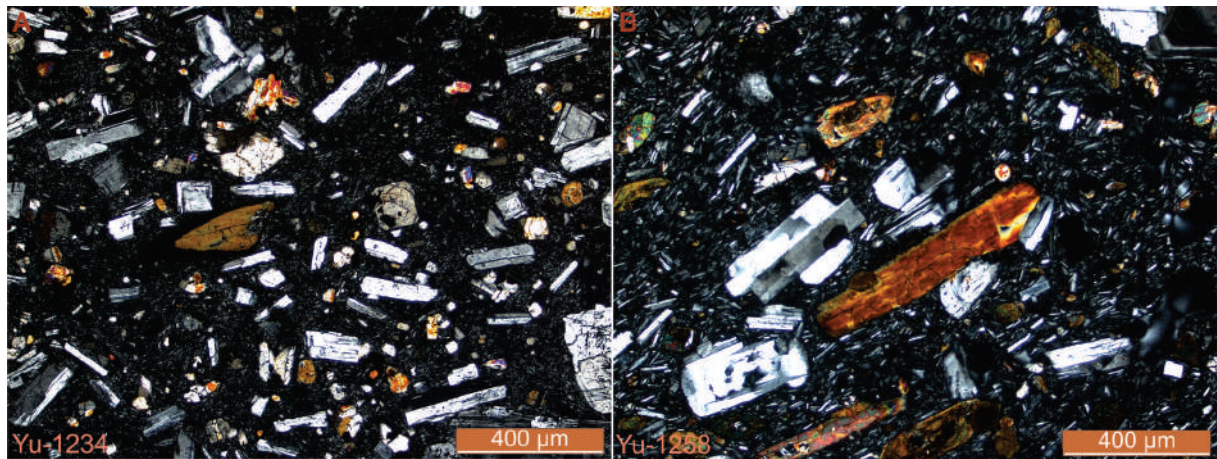


Figura 4.2 Fotografías de secciones delgadas de andesitas del volcán Yucamane Chico. A) Muestra de lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y anfíbol, de textura porfírica. B) Muestra de lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno y anfíbol contenidos dentro de una pasta intersertal.

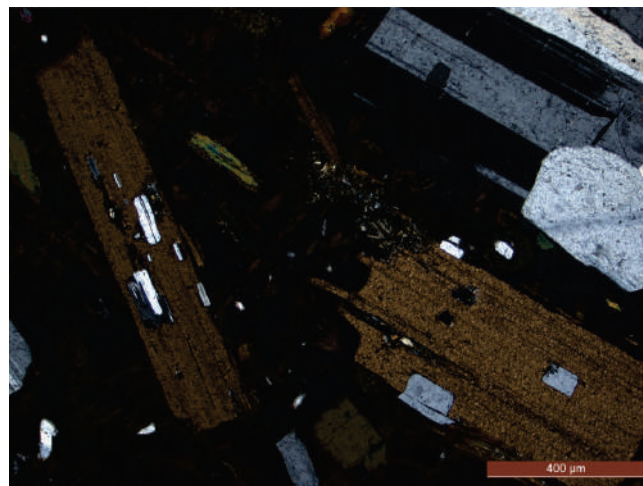


Figura 4.3 Fotografía de una sección delgada de una dacita del volcán Yucamane Chico, en donde se distinguen cristales de biotita, plagioclasa y anfíbol dentro de una pasta vítrea.

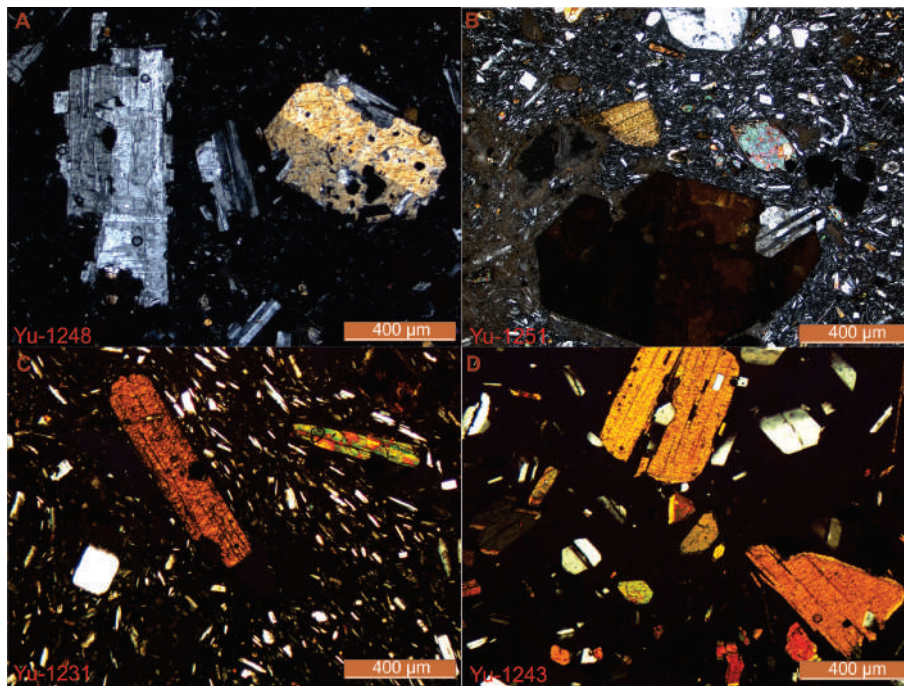


Figura 4.4 Fotografías de secciones delgadas de andesitas del volcán Calientes. A) Muestra de lava con cristales subhedrales de plagioclasa y ortopiroxeno. B) Muestra de lava con cristales de biotita, plagioclasa y anfíbol contenidos en una pasta microlítica. C) Muestra de lava con cristales de biotita, anfíbol y plagioclasa, de textura porfírica. D) Muestra de lava con cristales de biotita, anfíbol y plagioclasa incluidos dentro de una pasta vítrea.

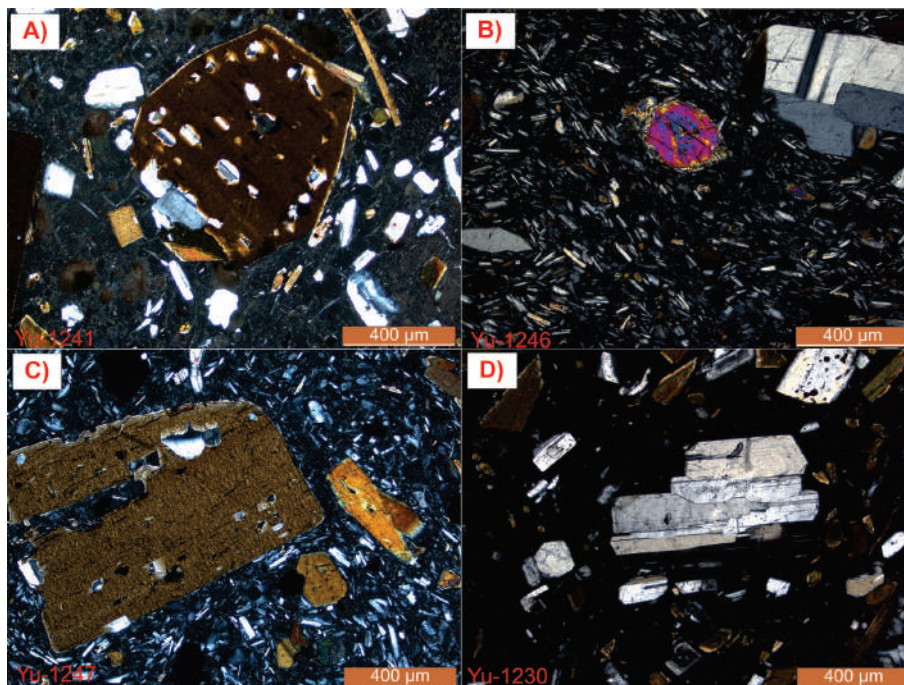


Figura 4.5 Fotografías de secciones delgadas de dacitas del volcán Calientes. A) Lava con cristales de plagioclasa, biotita y anfíbol, de textura porfírica. B) Lava con cristales de plagioclasa y clinopiroxeno incluidos dentro de una pasta de tipo intersertal. C) Muestra de domo con cristales de biotita, anfíbol, plagioclasa y óxidos de Fe-Ti, de textura porfírica. D) Lava con cristales de plagioclasa y anfíbol incluidos dentro de una pasta vítrea.

La biotita (6-8 vol. %) presenta un hábito euhedral y subhedral y mide menos de 1 mm. Algunos fenocristales contienen inclusiones de microlitos de plagioclasa y óxidos de Fe y Ti (Figura 4.5). El clinopiroxeno (menos de 4 vol. %) tiene forma subhedral a anhedral, y también tamaños variables, tanto en fenocristales (<1.5 mm) como en microfenocristales (200- 350 μm); algunos presentan inclusiones de óxidos de Fe y Ti.

Se distinguen diversos tipos de pastas: unas constituidas de un vidrio oscuro con algunos microcristales y microlitos (ejemplo Yu-12-30, Yu-12-41), mientras que otras presentan una pasta microcristalina compuesta por microcristales de plagioclasa y piroxeno (ejemplo Yu-12-46, Yu-12-47).

4.3 VOLCÁN YUCAMANE

4.3.1 Andesitas básicas

Estas rocas son poco comunes en la serie del volcán Yucamane y solo están presentes en la etapa "Yucamane III". Corresponden a lavas masivas de color gris, las cuales presentan una textura porfírica con una pasta microcristalina (Yu-18, Yu-19, Yu-12-16, Yu-12-17) (Figura 4.6). Asimismo, corresponden a escorias pertenecientes a flujos de escoria (Yu-20, Yu:12-06, 12-07, 12-24) y caídas de escorias (Yu:12-29, 12-72B, 12-75, 13-13, 13-25). Por su parte, estas últimas rocas presentan texturas porfíricas con matriz intersertal. Las andesitas están constituidas de minerales de plagioclasa, clinopiroxeno, anfíbol, óxidos de Fe-Ti y, eventualmente, ortopiroxeno y olivino.

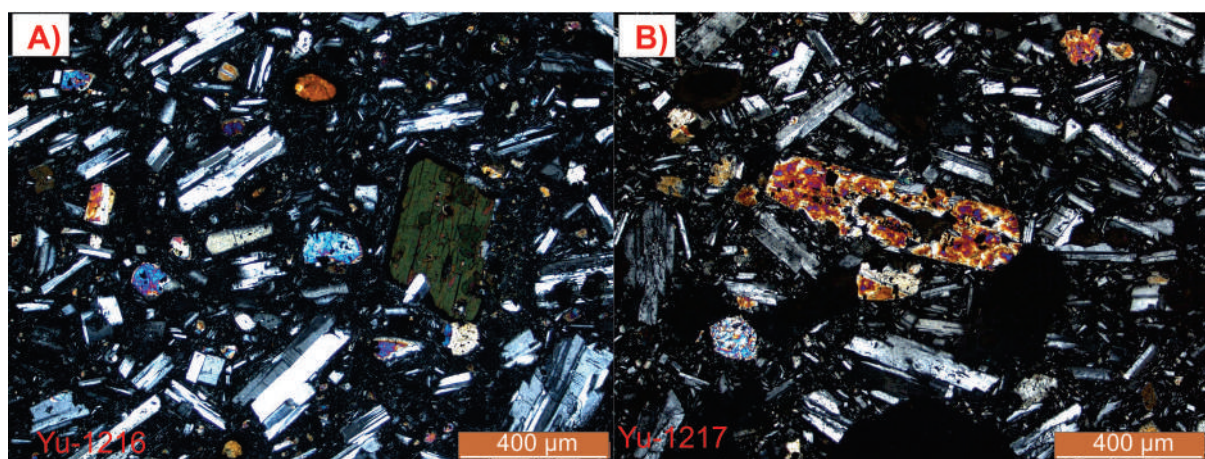


Figura 4.6 Fotografías de secciones delgadas de andesitas básicas de la etapa "Yucamane III". A) Muestra de lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y anfíbol de textura porfírica. B) Muestra de lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno de textura porfírica.

Las lavas están constituidas de cristales de plagioclasa de formas subhedrales y euhedrales que se agrupan generalmente en tres generaciones: los microlitos menores de 50 μm dispersos en la pasta, los microcristales que miden entre 50 y 200 μm y los fenocristales que miden hasta 1.4 mm.

Asimismo, se distinguen cristales de clinopiroxeno de forma subhedral que mide hasta 700 μm . El anfíbol tiene forma subhedral, con delgados bordes de óxidos, y llega a medir hasta 500 μm . A veces, estos presentan inclusiones de clinopiroxeno, plagioclasa y óxidos de Fe-Ti. El olivino tiene forma subhedral, mide hasta 300 μm y se encuentra en menos de 2 % en volumen. El ortopiroxeno es poco frecuente, tiene forma subhedral y mide hasta 600 μm . Los óxidos de Fe-Ti llegan a medir hasta 200 μm y están principalmente en la pasta; como inclusiones se encuentran en los cristales de clinopiroxeno, ortopiroxeno, anfíbol y olivino. En determinadas

rocas se distinguen aglomerados de plagioclasa, clinopiroxeno, anfíbol y óxidos de Fe-Ti.

Por su parte, las escorias (Yu-20, Yu-12-06, 12-07, 12-24) presentan vesículas subredondeadas de tamaños milimétricos. Estas rocas contienen fenocristales de plagioclasa en proporciones que varían entre 15 y 25 % del total de la muestra. Estos cristales miden menos de 2 mm y frecuentemente presentan texturas en tamiz o *sieve*. El clinopiroxeno mide menos de 1.5 mm; se presenta en forma de cristales euhedrales a subhedrales que se encuentran entre el 5 y 10 % del volumen. El ortopiroxeno aparece en forma de fenocristales subhedrales que miden menos de 0.5 mm y representan menos del 5 % del total de la muestra. Los óxidos de Fe-Ti aparecen en diversas formas, ya sea como microcristales en la pasta o como inclusiones en los piroxenos y raramente en las plagioclasas; en la pasta, se distingue una importante proporción de microlitos de plagioclasa.

4.3.2 Andesitas

Corresponden principalmente a flujos de lava (Yu:12-25, 12-26, 12-27, 12-28, 12-53, 12-54, 12-59, 12-60, 12-61, Yu-32), bloques juveniles de depósitos de flujo de bloques y cenizas (Yu:12-04, 12-08, 12-13, 12-21, 12-52, 12-70, 12-73, 13-05, 13-09), flujo de pómez y ceniza (Yu:14-06D1; 14-06D2) y caída de pómez (Yu:12-49, 13-18, 13-26). En general, estas rocas contienen fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, anfíbol, biotita y óxidos de Fe-Ti, y raramente ortopiroxeno, olivino y esfena (Figura 4.7).

Las lavas andesíticas son densas, de color gris y poco o nada alteradas. Estas presentan generalmente texturas porfíricas, con una pasta vítrea a intersertal. En estas rocas, las plagioclasas son de formas subhedrales a euhedrales. Se distinguen hasta tres familias de plagioclasas: los microlitos menores de 100 mm, dispersos en la pasta; los microcristales menores de 300 mm; y los fenocristales que llegan a medir hasta 2 mm. Algunos presentan textura *sieve* o tamiz (Yu:12-25; 12-54; 12-60).

El anfíbol es de forma euhedral y subhedral, y mide hasta 700 μm . Frecuentemente, presenta bordes de óxidos y algunos se encuentran totalmente remplazados en óxidos. Otros presentan bordes gabroicos con presencia de plagioclasas, piroxenos y óxidos de Fe-Ti (Yu-12-60). Los piroxenos presentan formas subhedrales a euhedrales, donde principalmente predomina el clinopiroxeno que mide menos de 600 mm. El ortopiroxeno, de forma euhedral a subhedral, mide menos de 700 mm.

La biotita está presente solo en algunas rocas; estas tienen formas euhedrales a subhedrales y alcanzan a medir 1.4 mm. En general, presentan inclusiones de plagioclasa y eventualmente de óxidos de Fe-Ti. Algunas biotitas presentan delgados bordes de óxidos (Yu-12-54).

El olivino, de forma subhedral, está presente en determinadas rocas (Figura 4.7). Los óxidos de Fe-Ti están presentes principalmente en la matriz o como inclusión en fenocristales de anfíbol, piroxenos y biotita. Frecuentemente, en determinadas

rocas, se distinguen aglomerados de piroxenos, óxidos de Fe-Ti y plagioclasas.

Los bloques juveniles pertenecientes a flujos de bloques y cenizas son grises y densos. Estos presentan texturas porfíricas con una pasta vítrea a intersertal (Figura 4.8). En estas rocas, las plagioclasas tienen hábitos subhedrales a euhedrales, las cuales se agrupan al menos en tres familias: los microlitos menores de 100 mm, dispersos en la pasta; los microcristales menores de 200 mm; y los fenocristales que llegan a medir hasta 7 mm.

El anfíbol es euhedral y subhedral y mide hasta 6 mm. A veces, algunos presentan bordes de óxidos (Figura 4.8) y otros se encuentran totalmente remplazados por óxidos. El clinopiroxeno se presenta en forma de cristales subhedrales a euhedrales y mide menos de 600 mm. El ortopiroxeno se presenta de forma euhedral a subhedral y mide menos de 500 mm. Las biotitas tienen formas euhedrales a subhedrales y alcanzan a medir 1.2 mm; en general, presentan inclusiones de plagioclasa y eventualmente de óxidos de Fe-Ti. Los óxidos de Fe-Ti están presentes principalmente en la matriz o como inclusión en fenocristales de anfíbol, piroxeno y biotita. Frecuentemente, se distinguen aglomerados de piroxenos, óxidos de Fe-Ti y plagioclasas.

Las pómez tienen vesículas de formas irregulares a subredondeadas, que miden menos de 7 mm. Estas presentan principalmente fenocristales de plagioclasa de formas euhedrales a subhedrales, en poca proporción volumétrica (5-10 %). Así mismo, se distinguen cristales de ortopiroxeno de forma euhedral a subhedral que miden hasta 1.0 mm. La biotita de forma subhedral (2-4 % en volumen) mide hasta 3 mm, y contiene inclusiones de plagioclasa. Los anfíboles (5-8 % en volumen) son de formas subhedrales a euhedrales y miden hasta 600 mm. La mayoría presentan bordes delgados de óxidos. Los óxidos están presentes principalmente en la matriz y como inclusiones en cristales de biotita y piroxeno. Estos llegan a medir hasta 300 mm. Se distinguen aglomerados de piroxeno, plagioclasa y óxidos de Fe-Ti.

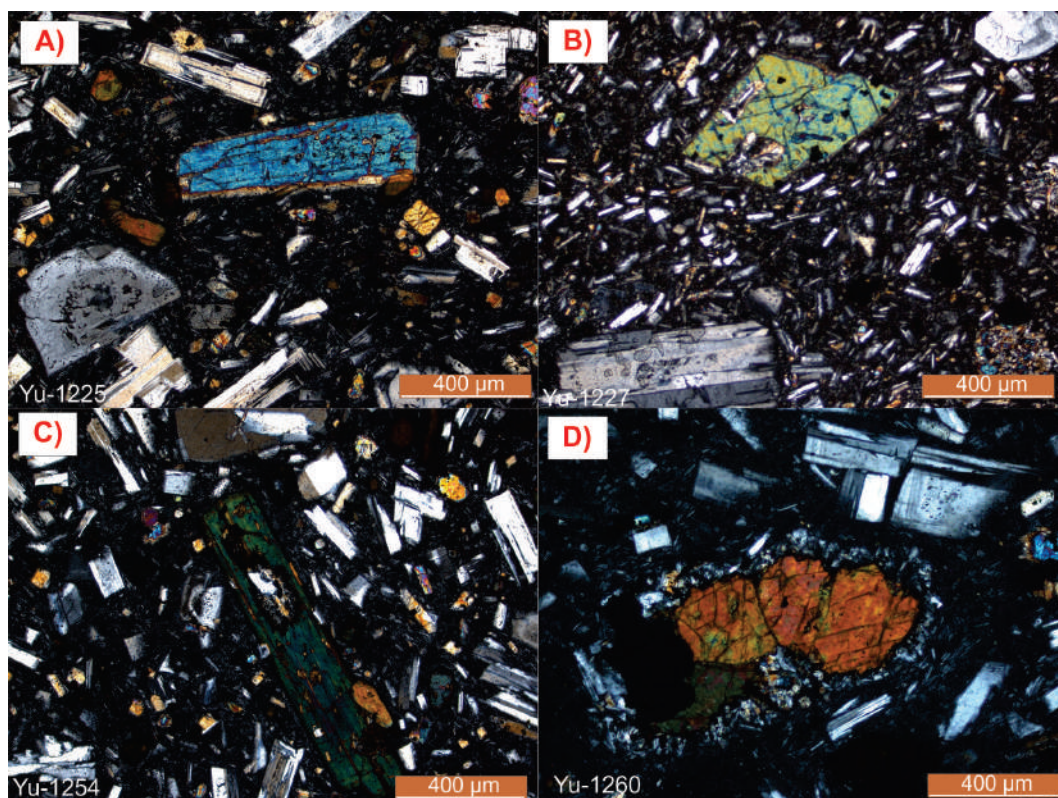


Figura 4.7 Fotografías de secciones delgadas de lavas andesíticas de textura porfirítica. A) Lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y anfíbol. B) Lava con cristales de plagioclasa, olivino y óxidos de Fe-Ti. C) Lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, anfíbol y biotita. D) Lava con cristales de plagioclasa y anfíbol que presentan una textura gabroica.

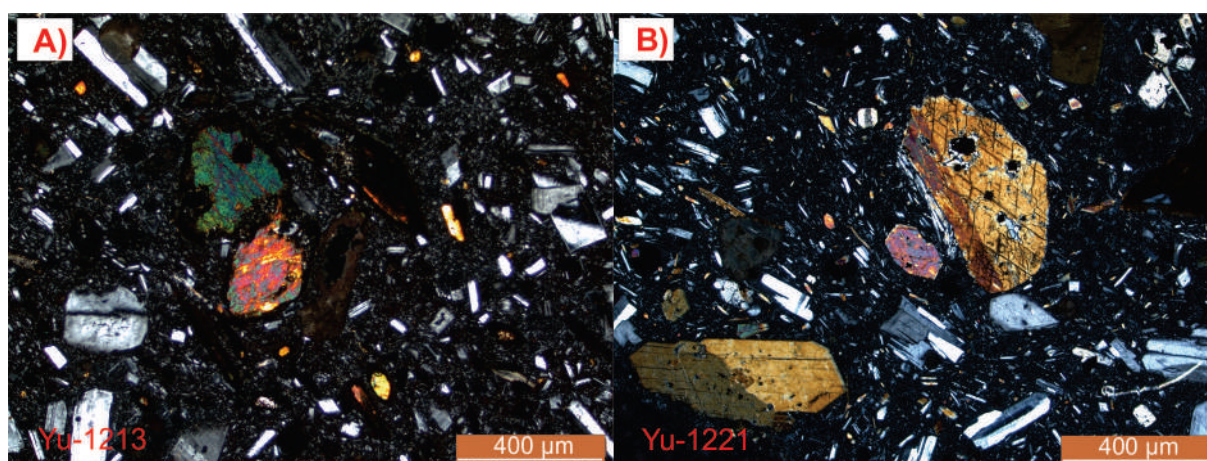


Figura 4.8 Fotografías de secciones delgadas de bloques juveniles andesíticos. A) Muestra de bloque juvenil con cristales plagioclasa, anfíbol y ortopiroxeno, de textura porfirítica. B) Muestra de bloque juvenil con cristales de plagioclasa, anfíbol, clinopiroxeno, de textura porfirítica.

4.3.3 Dacita

Corresponde a flujos de lava (Yu-26, Yu-11, Yu-12, Yu-31), depósito de flujos de bloques y cenizas (Yu-10, Yu:12-15, 12-68A, 12-69, 13-06, 13-17, 13-22B), flujo de pómez y ceniza (Yu:12-18, 12-56, 12-57, 14-05A, 14-06E) y depósito de *blast* (Yu-12-19, 12-28).

Las lavas presentan una textura porfirítica con una pasta vítrea. Contiene cristales de plagioclasa, anfíbol, biotita, y óxidos de Fe-Ti. La plagioclasa tiene dos tipos de hábitos: euhedral y subhedral. Se distinguen dos familias de plagioclasa: los fenocristales que miden hasta 5.6 mm y los microcristales menores de 200 μm . Todos ellos están dispersos dentro de la pasta. Los fenocristales de anfíbol son de formas euhedrales a subhedrales y miden hasta 2 mm. Algunos de ellos presentan bordes delgados de óxidos. La biotita mide hasta 1 mm y se encuentra entre 2 a 5 % en volumen. Algunas biotitas presentan inclusiones de plagioclasa y óxidos de Fe-Ti. Las biotitas tienen mayormente hábitos subhedrales. Los óxidos de Fe-Ti están principalmente en la matriz y son menores de 100 μm .

Los bloques juveniles de los flujos de bloques y cenizas presentan una textura porfirítica con una pasta intersertal (Figura

4.9). También presentan vesículas irregulares y subredondeadas que miden hasta 3 mm. Estos bloques contienen cristales de plagioclasa, anfíbol, biotita, óxidos de Fe-Ti.

La plagioclasa es el fenocristal más abundante (20-30 % en volumen) y se presenta en forma de cristales euhedrales y subhedrales. Se distinguen dos familias de plagioclasa: los fenocristales que miden hasta 4.5 mm y los microcristales que son menores de 100 μm . Algunos presentan una textura *sieve* o tamiz en el centro o borde del cristal. Los fenocristales de anfíbol son de formas euhedrales a subhedrales y miden hasta 3 mm. Algunos de ellos presentan bordes delgados de óxidos.

El anfíbol constituye aproximadamente el 5-10 % de los fenocristales del total de la muestra. La biotita se encuentra entre 2 a 15 % en volumen, y mide hasta 2.8 mm. Se presenta en forma de fenocristales euhedrales a subhedrales con inclusiones de óxidos y plagioclasas en su interior. En algunos casos, presenta bordes delgados de óxidos de Fe-Ti. Los óxidos de Fe-Ti están principalmente en la matriz o como inclusión en fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, y son menores de 300 μm .

En algunas muestras (Yu-12-69), se distingue aglomerados de plagioclasas, anfíboles y óxidos de Fe-Ti.

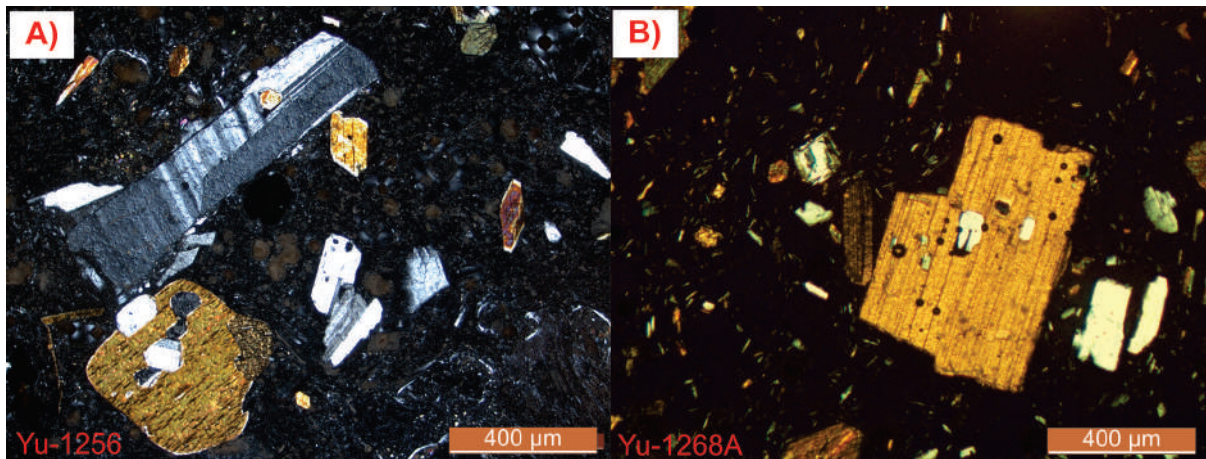


Figura 4.9 Fotografías de secciones delgadas de bloques juveniles dacíticos. A) Muestra de bloque juvenil que contiene cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, incluidos dentro de una matriz vítrea. B) Muestra que contiene cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, de textura porfirítica.

Las pómez presentan una textura vitroclástica, con una pasta vítrea (Figura 4.10). Estas rocas presentan un ensamble mineralógico constituido por plagioclasa, anfíbol, biotita, óxidos de Fe-Ti y eventualmente de clinopiroxeno.

La plagioclasa está presente entre el 20 a 30 % del volumen y tiene dos tipos de hábitos: euhedral y subhedral. Se distinguen

dos familias de plagioclasas: los fenocristales que miden hasta 3 mm y los microcristales que son menores de 100 μm , dispersos dentro de la pasta. Los fenocristales de anfíbol (4 a 8 % en volumen) son de formas euhedrales a subhedrales y miden hasta 2.0 mm. Algunos presentan bordes delgados de óxidos y otros están completamente remplazados en óxidos de Fe-Ti.

En algunas muestras se distinguen cristales de anfíbol con bordes gabraicos, constituidos de cristales de plagioclasa y óxidos de Fe-Ti. En algunas rocas se distinguen fenocristales de biotita (<5 % en volumen) y miden hasta 2.4 mm. Las biotitas tienen mayormente hábitos subhedrales y presentan inclusiones de óxidos de Fe-Ti y plagioclasas. Los cristales de clinopiroxeno

están en aproximadamente 1 % en volumen, y tienen formas subhedrales; estos miden menos de 400 μm . Los óxidos de Fe-Ti están presentes principalmente en la matriz y son menores de 300 μm .

En la tabla 4.1, se presenta el resumen del estudio petrográfico de muestras de rocas del complejo Yucamane-calientes.

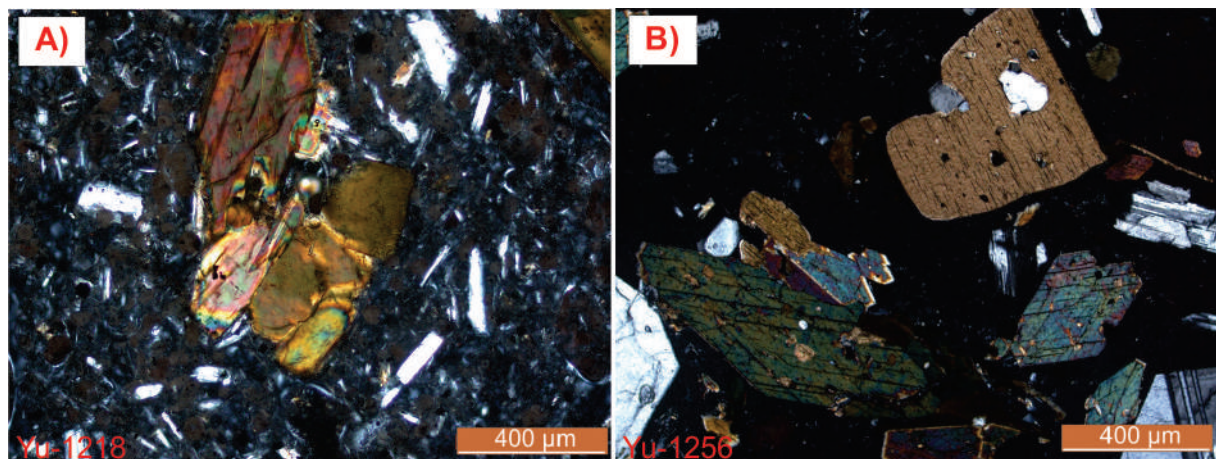


Figura 4.10 Fotografía de pómez dacíticas. A) Pómez con cristales de plagioclasa y anfíbol dentro de una pasta relativamente rica en microcristales y vesículas. B) Pómez con cristales de plagioclasa, biotita y anfíbol englobados dentro de una pasta vítrea.

Tabla 4.1
Resumen de las características petrográficas del complejo volcánico Yucamane-Calientes

Tipo petrográfico	VOLCÁN YUCAMANE CHICO		VOLCÁN CALIENTES		VOLCÁN YUCAMANE		
	Andesita	Dacita	Andesita	Dacita	Andesitas básicas	Andesita	Dacita
Fenocristales vol.%	30-40	30-35	20-25	30-40	15-20	30-35	20-30
Matriz vol.%	50-55	50-60	60-65	50-55	30-35	50-55	50-60
Vesículas vol.%	1-5	5-10	5-10	1-5	40-45	5-10	5-10
Máximo tamaño de los cristales	1 mm	4 mm	7 mm	3 mm	1,4 mm	2 mm	7 mm
Textura	Porfírica - Interseccional	Porfírica - Interseccional - Vitrea	Porfírica - Interseccional - Vitrea	Porfírica - Interseccional - Vitrea	Porfírica - Microcristalina	Porfírica - Interseccional	Porfírica - Interseccional - Vitroclástica
Ensamble mineralógico	Pl-Anf-Opx-Cpx-Ox	Pl-Bt-Anf-Ox	Pl-Anf-Bt-Opx-Cpx-Ox	Pl-Bt-Anf- Opx-Cpx-Ox	Pl-Cpx-Anf-Opx-Ol-Ox	Pl-Cpx-Anf-Bt-Opx-Ol-Sf-Ox	Pl-Bt-Anf-Opx-Ox
Características Texturales	- Pl sieve		- Pl sieve		- Pl sieve	- Pl sieve	
	- Pl con alteración	- Pl sieve	- Pl con alteración	- Pl sieve	- Pl sin alteración	- Pl con alteración	- Pl sieve
	- Anf con bordes de óxidos	- Pl sin alteración	- Anf con bordes de óxidos	- Pl sin alteración	- Anf y Bt con bordes de óxidos	- Anf con bordes de óxidos	- Anf con bordes de óxidos
	- Anf parcial o completamente reemplazados por óxidos	- Anf con bordes de óxidos	- Anf y Bt completamente reemplazados por óxidos	- Bt reemplazadas por óxidos y bordes corroídos	- Bt fracturadas	- Anf completamente reemplazados por óxidos	- Bt con bordes corroídos

La abreviación que se utiliza en el texto y el cuadro es la siguiente: Pl = plagioclasa; Anf = anfíbol; Bt = biotita; Cpx = clinopiroxeno; Opx = ortopiroxeno; Ol = Olivino; Sf = esfena; Ox = óxidos

CAPÍTULO V

GEOQUÍMICA DE ROCAS

El estudio geoquímico tiene como objetivo comparar las características geoquímicas entre rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes (CVYC) y las rocas del volcán Yucamane Chico, para establecer la presencia de uno o más sistemas magmáticos al interior de dichos volcanes; asimismo, tiene como objetivo identificar los diferentes procesos magmáticos que intervinieron en la génesis y evolución de magmas de dicho complejo volcánico. Todas las muestras del CVYC fueron ordenadas en orden cronológico, dentro de la secuencia estratigráfica previamente presentada en el Capítulo 3.3.

5.1 MÉTODO ANALÍTICO

Entre los años 2012 y 2014, fueron efectuados 8 análisis químicos de elementos mayores y traza de rocas del volcán Yucamane Chico, 16 análisis del volcán Calientes y 38 análisis del volcán Yucamane, en la Universidad de Bretagne Occidental, Brest (Francia), bajo la dirección de la Dra. Céline Liorzou. Todos los elementos fueron analizados mediante el método de espectrometría de emisión atómica por acoplamiento inductivo de plasma (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES).

Anteriormente, en el año 2004, se efectuaron 18 análisis químicos de elementos mayores y trazas de rocas en el Laboratorio de Química del Servicio Geológico de Canadá a través del Proyecto Multinacional Andino-Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA). En aquella oportunidad, todos los elementos trazas fueron analizados por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry – ICPMS*), salvo el Rb que ha sido determinado por espectrometría de emisión. Posteriormente, para el tratamiento respectivo, todos los análisis

de elementos mayores fueron recalculados al 100 % en base anhidra, y la totalidad de hierro se expresa en forma de Fe_2O_3 .

5.2 CLASIFICACIÓN DE LA SERIE

En la clasificación química internacional de rocas volcánicas, es decir, en el diagrama TAS (“Total de Alcalinos versus Sílice”) de Le Bas et al. (1986) (Figura 5.1), las rocas del volcán Yucamane Chico son de composición andesítica (57.1–62.1 wt.% SiO_2) y dacítica (64.4 wt.% SiO_2). Asimismo, las rocas del volcán Calientes son de composición andesítica (60.1–62.7 wt.% SiO_2) y dacítica (63.2–67.7 wt.% SiO_2), mientras que las rocas del volcán Yucamane son de composición andesítica básica (53.4–56.7 wt.% SiO_2), andesitas (57.4–62.9 wt.% SiO_2) y dacítica (63.0–66.9 wt.% SiO_2).

En toda la serie, las andesitas básicas están en menor proporción volumétrica (2-4 %). Asimismo, es necesario resaltar que las rocas del volcán Calientes en su mayoría son dacitas y las rocas del volcán Yucamane cubren un amplio espectro de composición desde andesitas básicas a dacitas.

En el diagrama triangular AFM de Kuno (1968) (Figura 5.2), se distingue que las rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes pertenecen a la serie calcoalcalina, típico de las rocas volcánicas de la Zona Volcánica Central (CVZ) de los Andes.

Según el diagrama K_2O vs. SiO_2 de Pecerillo & Taylor (1976) (Figura 5.3), las muestras del volcán Yucamane Chico y las muestras de las distintas etapas volcánicas del complejo Yucamane-Calientes corresponden a la serie calcoalcalina con alto contenido de K (1.4–3.7 wt.% K_2O), desde andesitas básicas hasta dacitas.

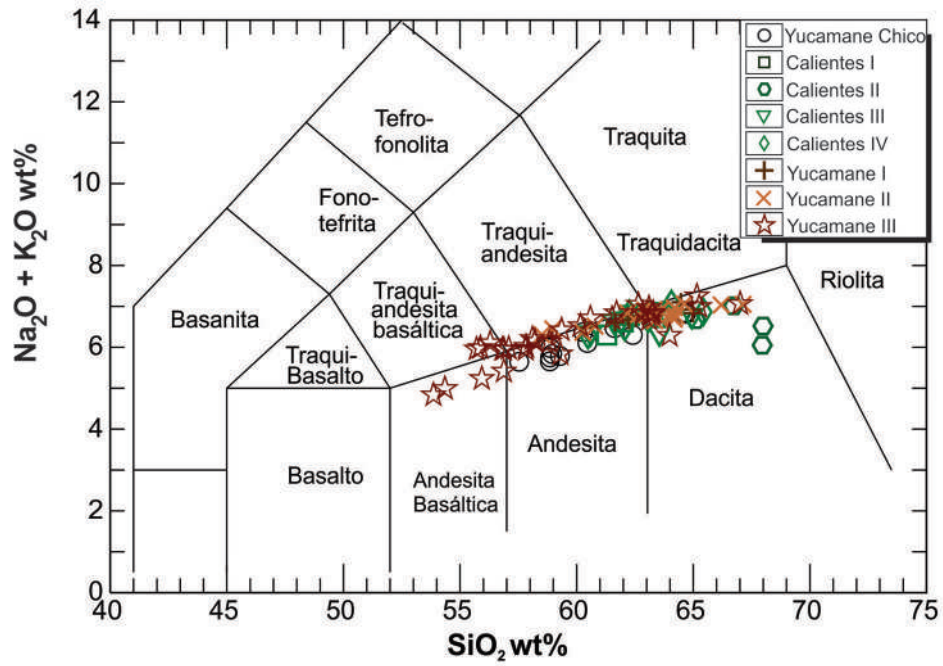


Figura 5.1 Diagrama de clasificación de rocas de las diferentes etapas volcánicas del complejo Yucamane-Calientes, "Total de alcalinos vs. sílice" (TAS), de Le Bas et al. (1986).

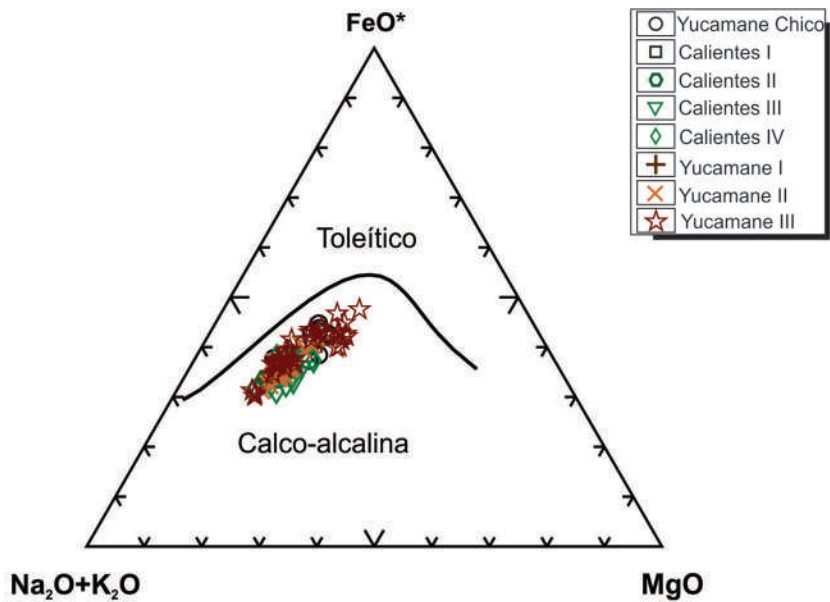


Figura 5.2 Composición de las rocas del complejo Yucamane-Calientes con el diagrama AFM de Kuno (1968).

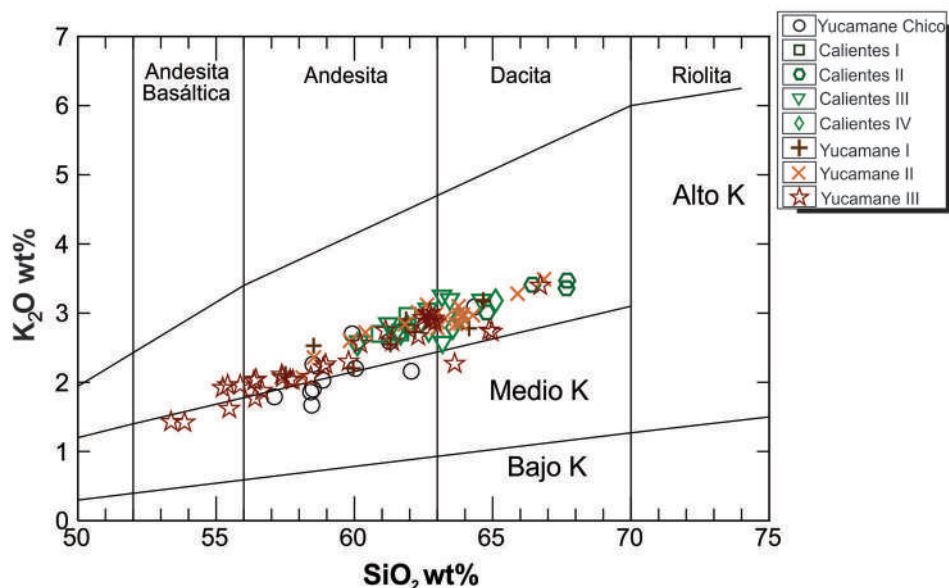


Figura 5.3 Diagrama K_2O vs. SiO_2 de Pecerillo & Taylor (1976) de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes que muestra tendencias moderada a fuertemente potásica.

5.3 EVOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS MAYORES

Los elementos mayores (SiO_2 , Na_2O , Al_2O_3 , K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO , MnO , P_2O_5) son aquellos que se encuentran en mayor abundancia en las rocas con respecto a los elementos traza. Mediante diagramas binarios, también conocidos como diagramas de Harker, se gráfica el óxido con respecto a la SiO_2 que generalmente es usado como un indicador del grado de diferenciación. Con los elementos mayores es posible conocer el modo de evolución magmática como, por ejemplo, la cristalización fraccionada o mezcla de magmas.

En los diagramas de Harker (Figura 5.4), pese a que algunos óxidos presentan ligeras dispersiones, se observa que la mayoría de las tendencias químicas son lineares y continuas. En efecto, se aprecia una disminución en las concentraciones de Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO y P_2O_5 a medida que el SiO_2 va aumentando, hasta formar una correlación negativa.

En el diagrama Al_2O_3 vs. SiO_2 se observa una tendencia lineal negativa bien clara a medida que el SiO_2 aumenta. Esta disminución puede estar asociada al fraccionamiento de la plagioclasa.

El TiO_2 y Fe_2O_3 (Figura 5.4) presentan una correlación lineal negativa, que puede estar asociada al fraccionamiento del titanio-magnetita y la biotita durante la diferenciación de la serie. Es necesario mencionar que en el diagrama de TiO_2 vs. SiO_2 ,

un grupo de rocas del Yucamane Chico presenta menores valores en TiO_2 respecto a las rocas de los volcanes Yucamane y Calientes.

El MgO (Figura 5.4) disminuye respecto al SiO_2 , con una ligera dispersión en ciertas andesitas y dacitas. La disminución de este óxido podría estar asociada a la cristalización del olivino, clinopiroxeno y ortopiroxeno.

El CaO disminuye a medida que aumentan los valores en SiO_2 (Figura 5.4). Esto puede sugerir el fraccionamiento de clinopiroxeno y plagioclasa.

El P_2O_5 presenta una correlación lineal negativa, que puede estar asociada al fraccionamiento de apatito durante la diferenciación magmática. En el diagrama P_2O_5 vs. SiO_2 , hay que resaltar que un grupo de rocas del Yucamane Chico tienen menores valores en P_2O_5 respecto a las rocas de los volcanes Yucamane y Calientes.

Por el contrario, en el diagrama de K_2O respecto al SiO_2 , se observa un incremento de este óxido a medida que la sílice aumenta, hasta presentar una correlación positiva. El Na_2O no muestra una evolución muy marcada, mas se aprecia una estabilidad a medida que los valores de sílice aumentan.

En general, los diagramas muestran buenas correlaciones lineares que son compatibles con un modelo de evolución de la serie por procesos de cristalización fraccionada.

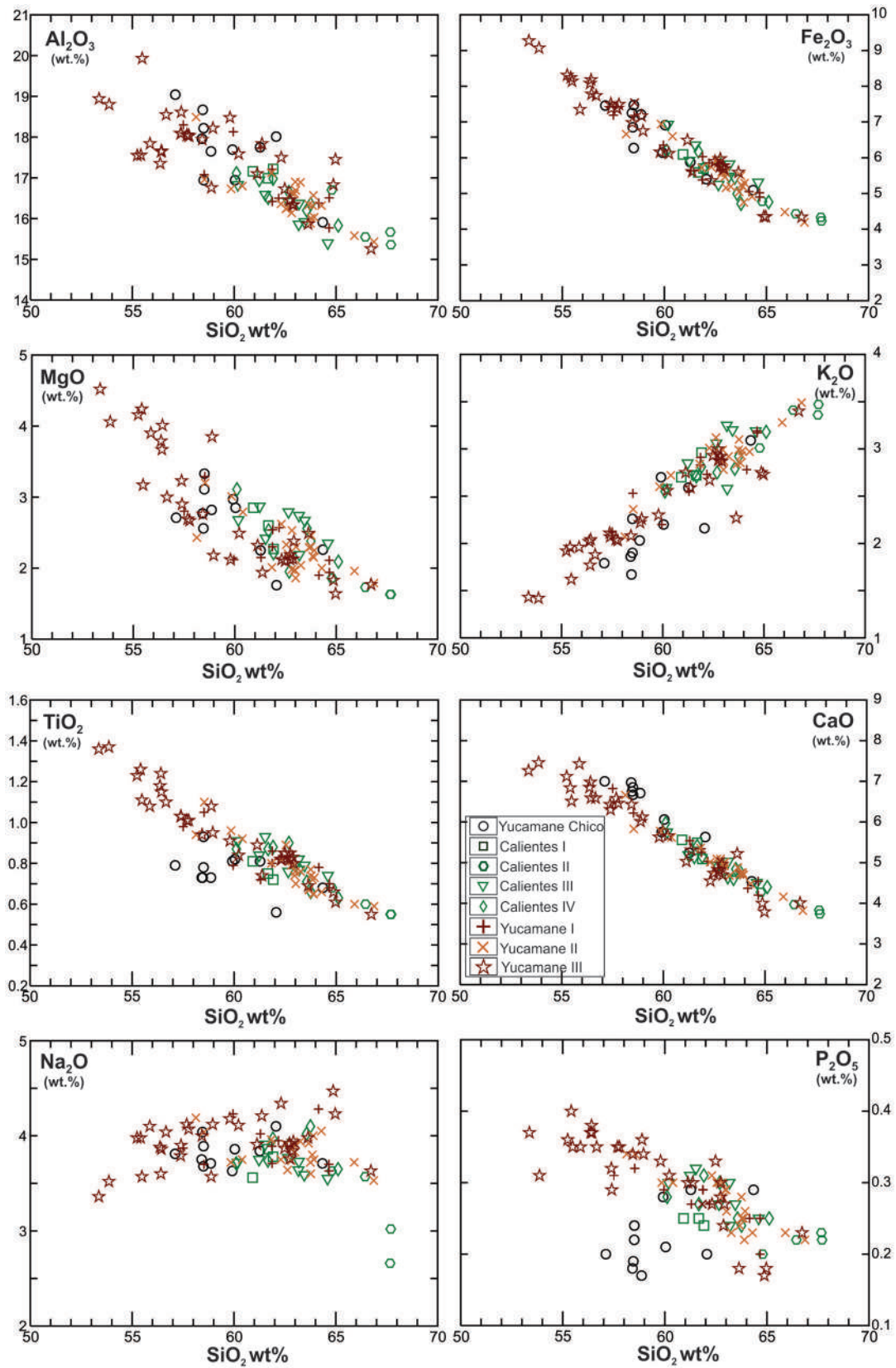


Figura 5.4. Diagramas de variación de elementos mayores versus el porcentaje en peso de sílice.

5.4 DIAGRAMAS DE VARIACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA

En la Figura 5.5, se muestran elementos traza con respecto a la sílice, la cual es considerada como un índice de diferenciación. En estos diagramas se aprecia que los elementos de gran radio iónico (LILE) como el Rb y el Th presentan correlaciones positivas muy marcadas con respecto al SiO_2 . El Ba presenta una gran dispersión, sin embargo existe una ligera tendencia de incremento a medida que aumenta la concentración en SiO_2 . Hay que resaltar que las rocas del volcán Yucamane Chico presentan bajos valores en Ba respecto a las rocas de los volcanes Yucamane y Calientes.

El Sr muestra una marcada dispersión de los datos en las andesitas, sin embargo, presenta una correlación negativa a medida que la SiO_2 aumenta. Este comportamiento puede ser el resultado del fraccionamiento de la plagioclasa en el magma residual. Aquí debemos resaltar que un grupo de andesitas del volcán Yucamane Chico presenta bajos valores respecto a las rocas de los volcanes Yucamane y Calientes.

Por otro lado, las tierras raras ligeras (LREE) -caso del La y Ce- muestran una ligera estabilidad de los valores, a excepción de las rocas del volcán Yucamane Chico, cuyos valores son inferiores a las rocas de los volcanes Yucamane y Calientes, pero aumentan a medida que incrementa la concentración en SiO_2 . Las tierras raras medianas (MREE), como el Sm, presentan una ligera correlación negativa, a excepción de las rocas del volcán Yucamane Chico, cuyos valores aumentan a medida que incrementa la concentración en SiO_2 . La disminución de Sm puede representar el fraccionamiento del anfíbol y clinopiroxeno. Entre las tierras raras pesadas (HREE) —caso del Yb y Dy—, estos muestran una ligera disminución de los valores durante la diferenciación.

Entre los elementos de gran potencial iónico (HFSE), el Nb (no presentado aquí) muestra una ligera estabilidad de los valores. Los elementos de transición, tales como Ni, V, Cr y Sc muestran correlaciones negativas con respecto a la SiO_2 ; esto puede estar asociado al fraccionamiento del olivino para el caso de Ni y clinopiroxeno para el caso del Cr. El empobrecimiento de V está ligado al fraccionamiento de los óxidos de Fe-Ti (ilmenita-titanomagnetita).

Estos diagramas muestran que existen ligeras variaciones en el comportamiento de elementos mayores y trazas a lo largo del tiempo, sobre todo de las rocas del «Yucamane III», las cuales

recubren el campo de los productos volcánicos de las etapas “Yucamane I” y “Yucamane II” y de rocas del volcán. Sin embargo se debe recalcar que globalmente las muestras del Calientes y del Yucamane cubren un mismo campo composicional. Por el contrario, las rocas del Yucamane Chico se caracterizan por presentar valores más bajos en varios elementos traza (La, Sm y Sr). A su vez, son ligeramente más enriquecidos en Yb respecto a las rocas de los volcanes Yucamane y Calientes.

5.5 DIAGRAMAS MULTIELEMENTOS

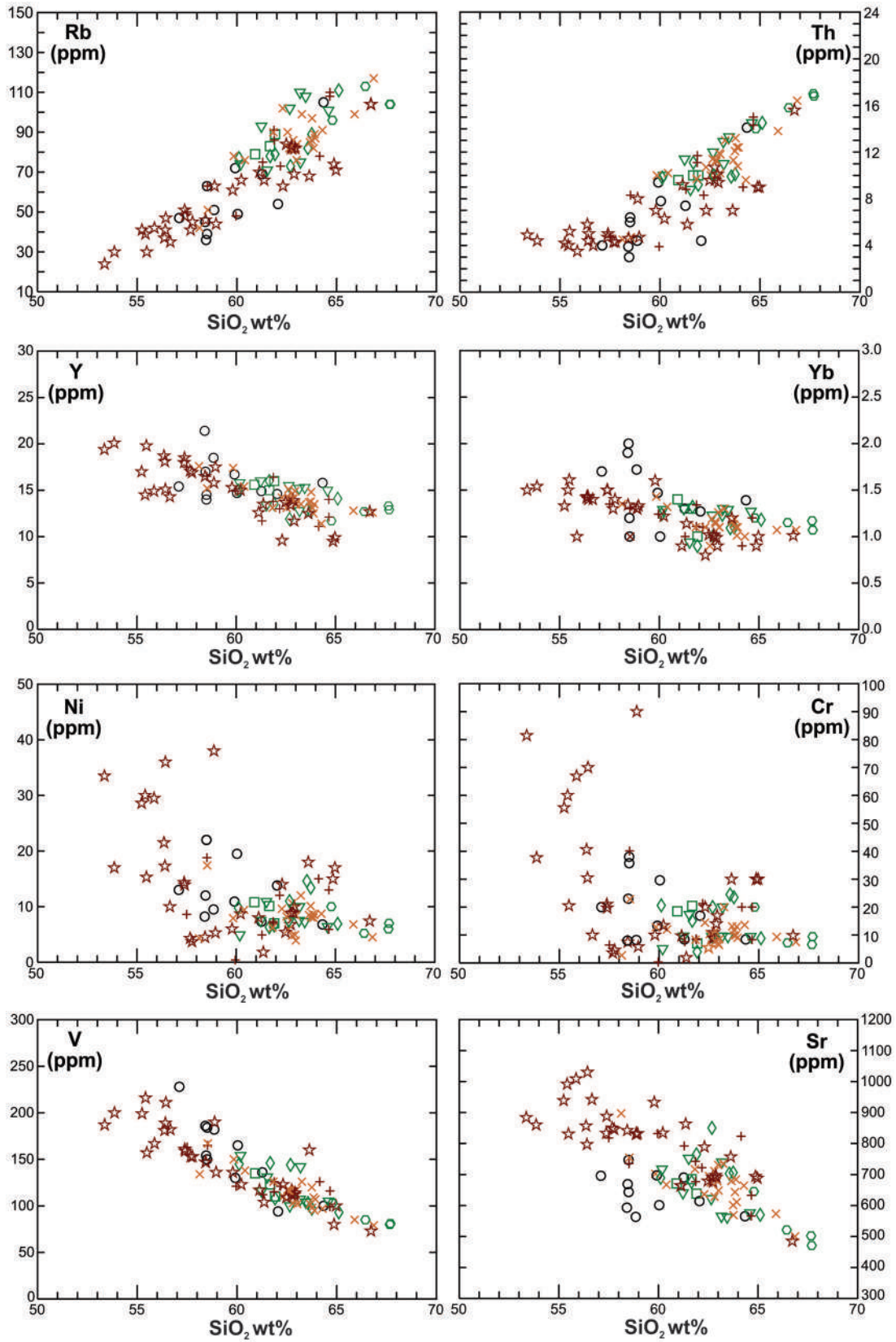
Se presentan ocho diagramas multielementos pertenecientes a las rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes y del volcán Yucamane Chico que fueron normalizados con valores del Manto primitivo (Sun y McDonough, 1989), como se presenta en la Figura 5.6, esto con el fin de facilitar la comparación entre las diversas etapas que conforman dicho complejo volcánico.

En los diagramas multielementales se pueden observar que en general las rocas de las distintas etapas evolutivas de este complejo volcánico muestran espectros multielementales similares; globalmente presentan un enriquecimiento marcado en elementos de gran radio iónico (LILE: Rb, K, Ba) y tierras raras ligeras (LREE: La, Ce).

Los elementos de fuerte potencial iónico (HFSE) como el Nb, presentan una dinámica anomalía negativa, más marcada en rocas del volcán Yucamane Chico y en rocas del «Yucamane III». Asimismo, el Th presenta un marcado enriquecimiento.

Es necesario resaltar que las rocas del “Yucamane II” y sobre todo “Yucamane III” son poco más empobrecidas en tierras raras pesadas, entre ellos el Dy e Yb, respecto a las rocas de los volcanes Yucamane Chico y Calientes.

Otra característica propia de las rocas del volcán Yucamane Chico y del complejo Yucamane-Calientes es la marcada anomalía negativa en P que puede deberse al fraccionamiento de apatito. Las anomalías más marcadas las presentan las rocas de los volcanes Yucamane Chico y la etapa “Yucamane III” (volcán Yucamane). Asimismo, presentan una anomalía en Zr asociada al fraccionamiento de zircón (menos marcada en rocas del volcán Yucamane Chico), así como una anomalía en Ti debido al fraccionamiento de los óxidos de Fe-Ti. Cabe señalar que todas estas características mencionadas son típicas de magmas de márgenes continentales activas ligadas a procesos de subducción como la Zona Volcánica Central de los Andes - CVZ (Wilson, 1989).



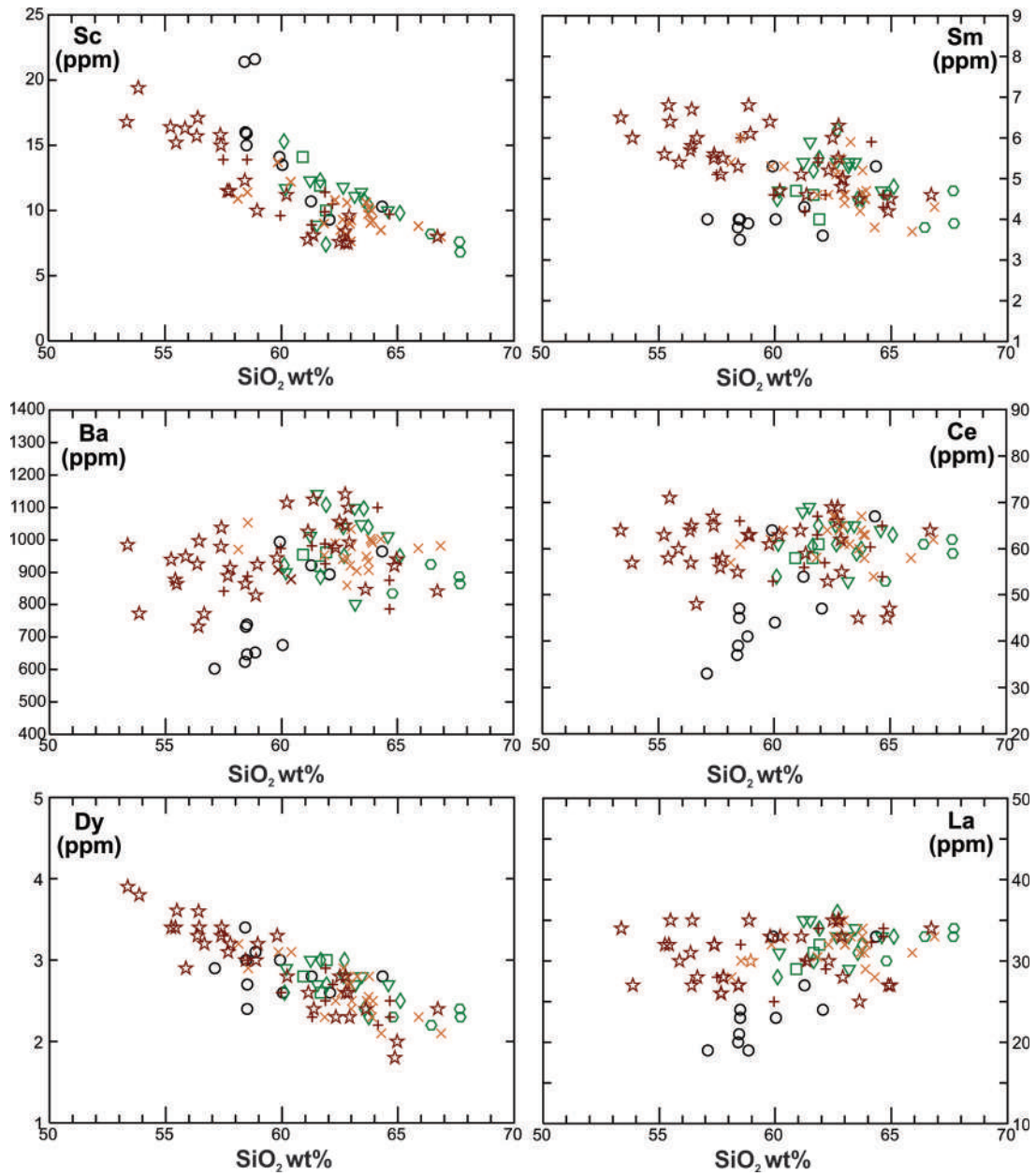


Figura 5.5 Diagramas de variación de elementos traza versus el porcentaje en peso de sílice

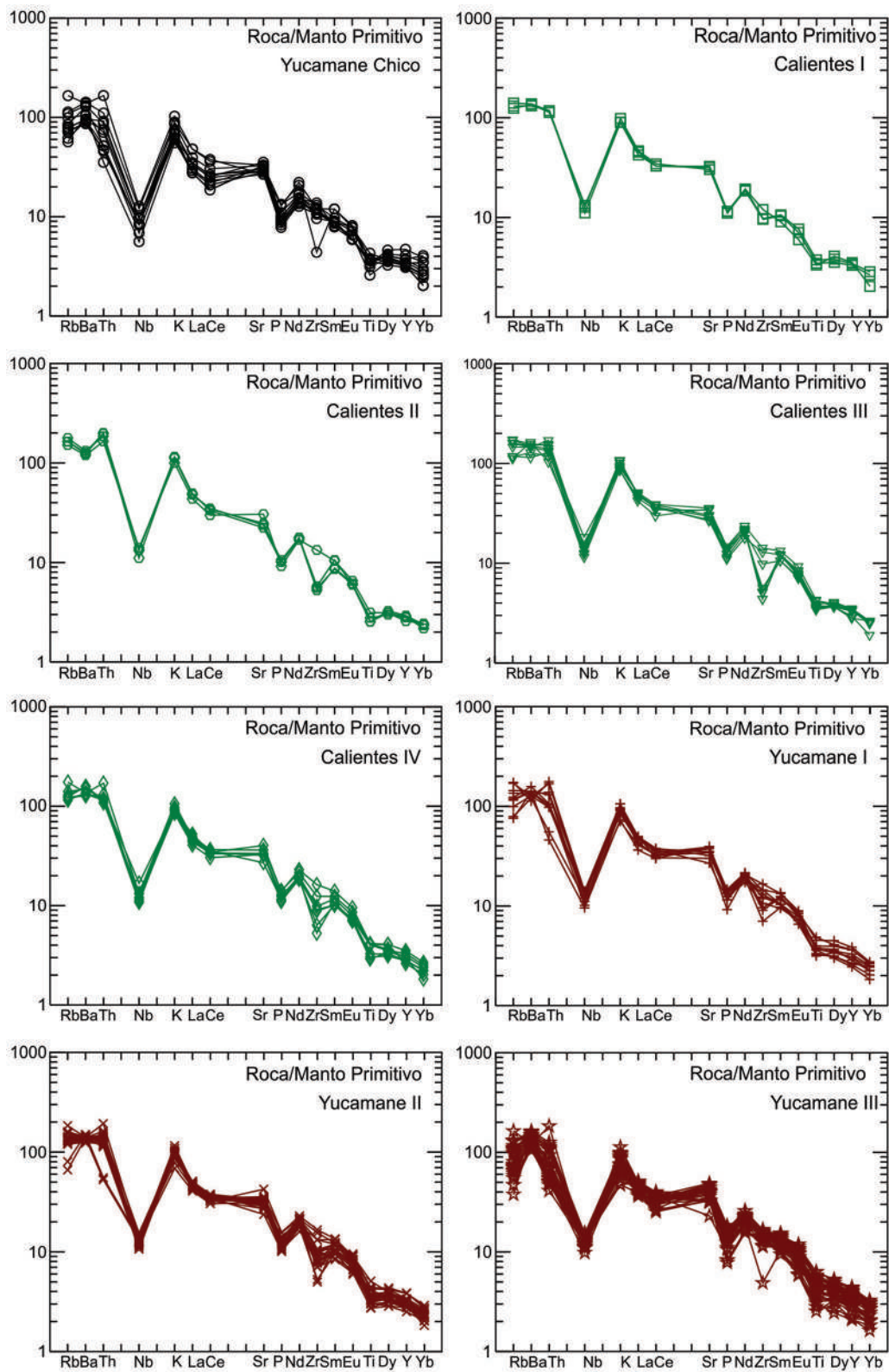


Figura 5.6 Diagramas multielementales de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes y volcán Yucamane Chico normalizados respecto al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).

5.6 DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS

En los diagramas de tierras raras de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes y del volcán Yucamane Chico (Figura 5.7), normalizadas a condrita, se puede observar a grandes rasgos patrones muy similares entre las distintas etapas volcánicas. De manera general, las rocas presentan un enriquecimiento en tierras raras ligeras-LREE ($86.0 < La_N < 150.6$) y un empobrecimiento en tierras raras pesadas-HREE ($4.5 < Yb_N < 11.6$). Por otro lado, las tierras raras pesadas (HREE) de rocas del "Yucamane III" ($4.5 < Yb_N < 9.9$) muestran valores más bajos respecto a las demás etapas evolutivas. Por otro lado, las rocas del volcán Yucamane Chico son más enriquecidas en tierras raras pesadas que en las rocas de los volcanes Yucamane y Calientes.

Todas las rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes muestran espectros clásicos de magmas calcoalcalinos de márgenes continentales activos (Wilson, 1989).

En los diagramas de las distintas etapas no se observa una ligera anomalía en Eu (Figura 5.7), a pesar del fraccionamiento de la plagioclasa observado en algunos elementos mayores durante la diferenciación (Figura 5.4). Es posible que este comportamiento se deba a que el Eu no ha sido incorporado en la plagioclasa. También puede reflejar condiciones de oxidación, donde el Eu está en forma de Eu^{3+} (Davidson et al., 1990).

5.7 DIAGRAMAS DE RATIOS

Los diagramas de ratios representan diferentes procesos de diferenciación, los cuales pueden aclarar mejor el modo de evolución de los magmas del complejo Yucamane-Calientes. Las tendencias negativas en los diagramas Dy/Yb y Sm/Yb vs. SiO_2 tienden a procesos de fraccionamiento del anfíbol producido en la corteza superior (Figura 5.8). Asimismo, en el diagrama La/Yb con respecto a la SiO_2 se muestra un enriquecimiento de este ratio, el cual está sujeto al fraccionamiento del anfíbol en la fase residual. Mientras, en el diagrama Sr/Y versus SiO_2 las muestras no definen un patrón claro. En tal sentido, se observa que las muestras del complejo volcánico Yucamane-Calientes siguen una tendencia asociada a importante fraccionamiento del anfíbol con plagioclasa y piroxeno.

5.8 ISÓTOPOS DE $^{87}Sr/^{86}Sr$, $^{143}Nd/^{144}Nd$

En este estudio, se presentan 10 análisis isotópicos $^{87}Sr/^{86}Sr$ y $^{143}Nd/^{144}Nd$ de muestras de lavas y productos piroclásticos

del complejo volcánico Yucamane-Calientes, analizados en el Servicio Geológico de Canadá, por medio del Proyecto Multinacional Andino-Geociencias para la Comunidades Andinas, en el año 2004.

Los isótopos de un elemento se caracterizan por presentar igual número atómico pero diferente número de masa. Se distinguen isótopos radiogénicos e isótopos estables. Los isótopos de Sr, Nd son isótopos radiogénicos, cuya composición inicial no puede sufrir variación sin una alteración o incorporación de otro material cortical durante su evolución.

Los productos volcánicos del complejo volcánico Yucamane-Calientes tienen razones isotópicas $^{87}Sr/^{86}Sr$ que están en un rango de 0.7065-0.7075, mientras que las razones de $^{143}Nd/^{144}Nd$ están en un rango de 0.51229-0.51243 (Tabla 5.1), similares a los magmas calcoalcalinos de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC).

En el diagrama de la Figura 5.9, las razones de $^{87}Sr/^{86}Sr$ muestran ligeras correlaciones positivas con respecto a la SiO_2 (Figura 5.9a), mientras que los ratios $^{143}Nd/^{144}Nd$ muestran correlaciones negativas respecto a la SiO_2 (Figura 5.9b). Se observa también que las dacitas tienen los más altos valores en $^{87}Sr/^{86}Sr$ (Tabla 5.1). Estas características sugieren la intervención de procesos de asimilación-cristalización fraccionada (AFC) durante la evolución de los magmas del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

En el diagrama $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs. $^{143}Nd/^{144}Nd$ (Figura 5.10), todos los productos del complejo volcánico Yucamane-Calientes se sitúan en el campo definido de la ZVC (Davidson et al., 1991; Gerbe & Thouret, 2004; Delacour et al., 2007). Hay que mencionar que los productos emitidos en la ZVC, son afectados por procesos de contaminación o una asimilación de magmas provenientes del manto debido a la presencia de una corteza continental muy engrosada (~65-75 km de espesor) en el sur peruano (Ryan et al., 2016).

En conclusión, según el análisis de los datos presentados en este trabajo se confirma que los magmas del complejo volcánico Yucamane-Calientes evolucionan por medio de un proceso de asimilación-cristalización fraccionada (AFC) durante su ascenso a la superficie. Las constantes recargas de magma y diferentes grados de asimilación cortical pueden explicar el rango de valores de las firmas isotópicas.

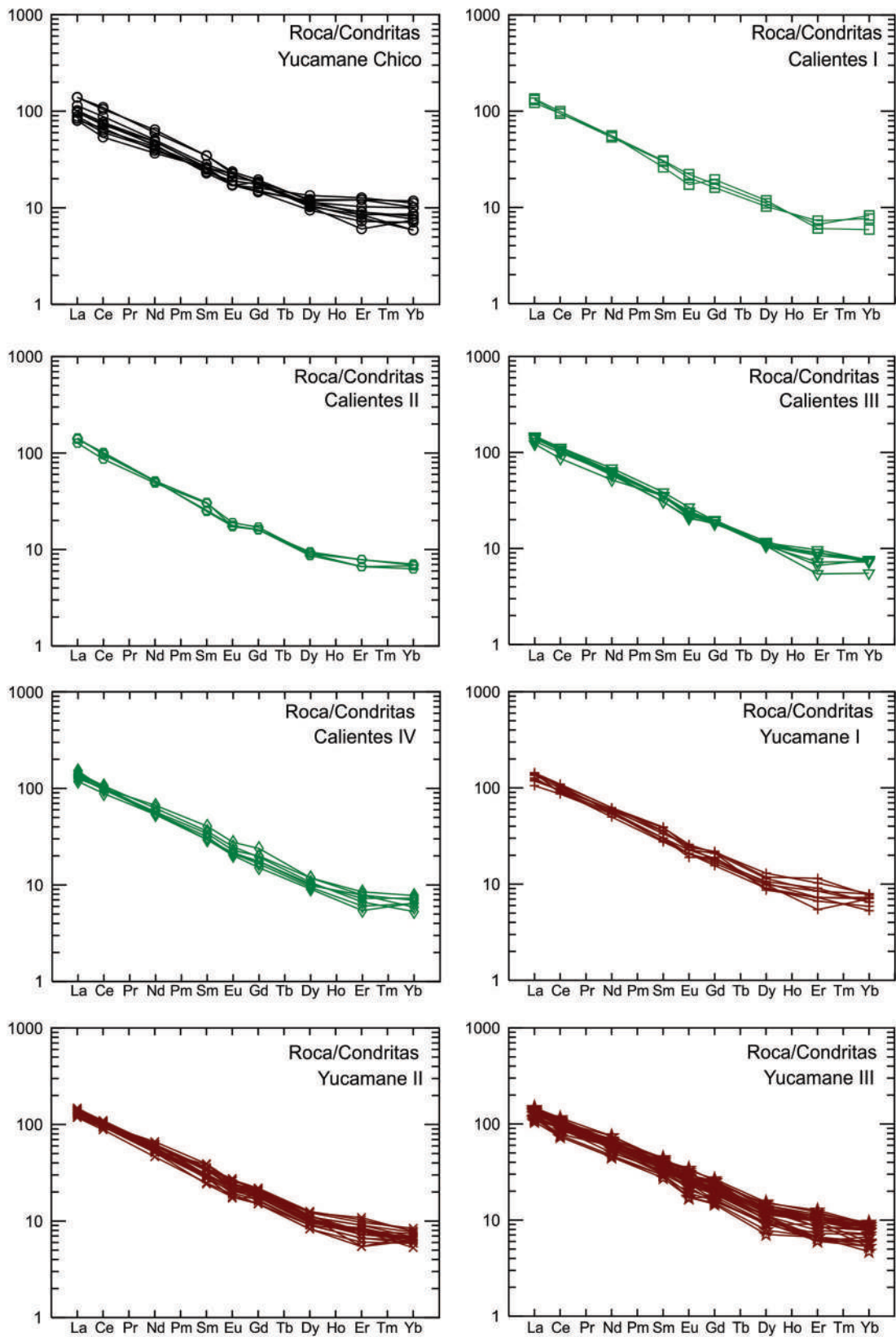


Figura 5.7 Diagrama de tierras raras normalizada a la condrita (Sun & McDonough, 1989).

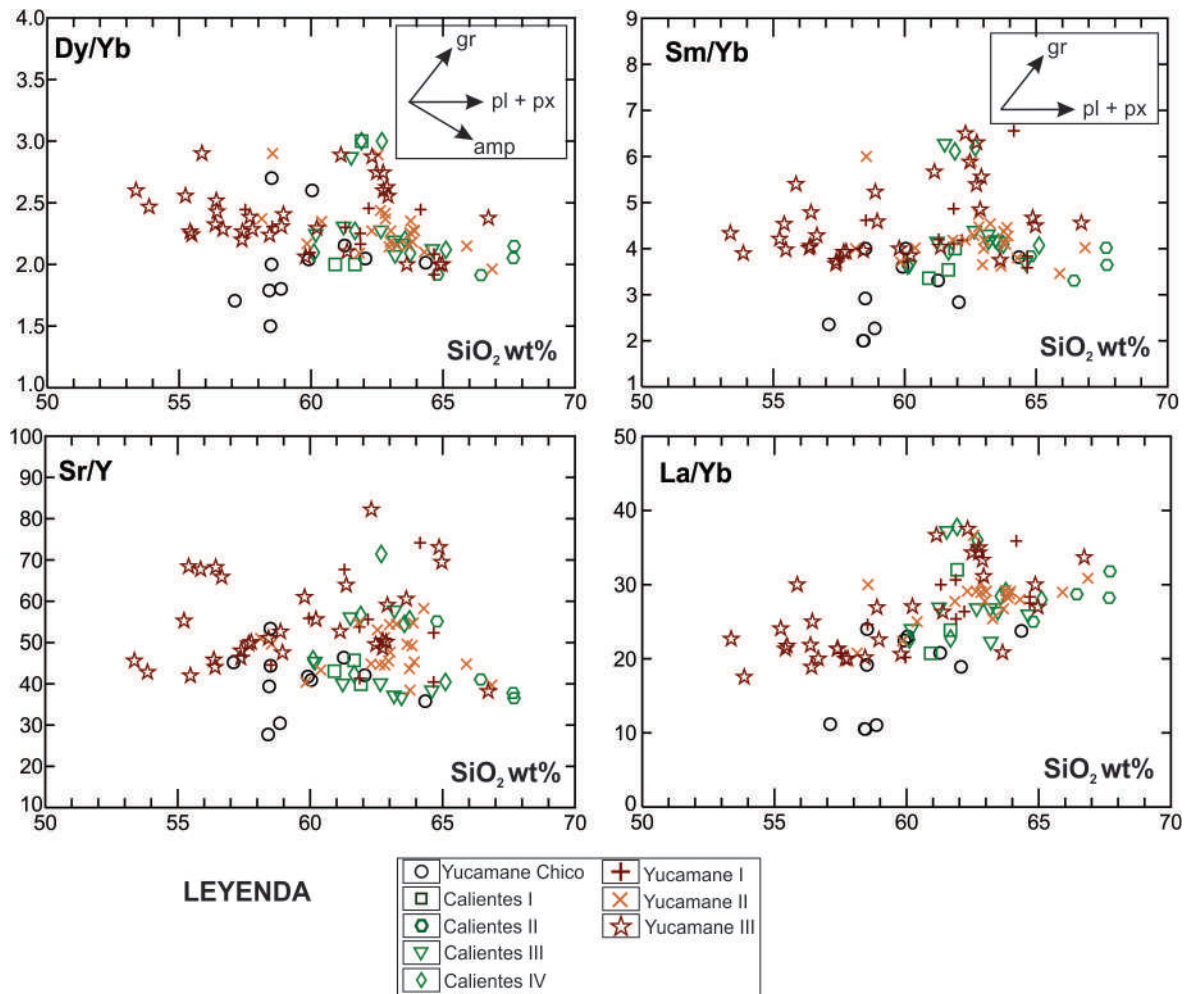


Figura 5.8 Diagramas de ratios Dy/Yb, Sm/Yb, La/Yb y Sr/Y vs. SiO₂ de rocas del complejo Yucamane Calientes y volcán Yucamane Chico. (gr) granate, (pl) plagioclasa, (px) piroxenos, (amp) anfíbol.

Tabla 5.1
Resultados de análisis isotópicos ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr y ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd de muestras efectuadas en el Servicio Geológico de Canadá

Yuca-Chico: Yucamane Chico; Calientes; Yuca I: Yucamane I; Yuca II: Yucamane II; Yuca III: Yucamane III

N° Muestra Etapa volcánica	Yu-22 Yuca Chico	Yu-08 Calientes	Yu-24 Calientes	Yu-09 Yuca I	Yu-28 Yuca I	Yu-31 Yuca I	Yu-10 Yuca II	Yu-19 Yuca III	Yu-26 Yuca III	Yu-12 Yuca III
SiO ₂ wt%	57.11	64.79	63.19	64.67	57.56	64.15	63.26	55.42	63.63	64.87
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.706523	0.70674	0.706533	0.706622	0.706465	0.706634	0.706542	0.706454	0.706425	0.706843
2 σ	0.000008	0.00001	0.000009	0.000008	0.00001	0.000008	0.000009	0.00001	0.000008	0.000008
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512325	0.512324	0.512341	0.512306	0.512345	0.51234	0.512328	0.512366	0.512364	0.512309
2 σ	0.000008	0.000006	0.000006	0.000006	0.000007	0.000008	0.000005	0.000008	0.000005	0.000008

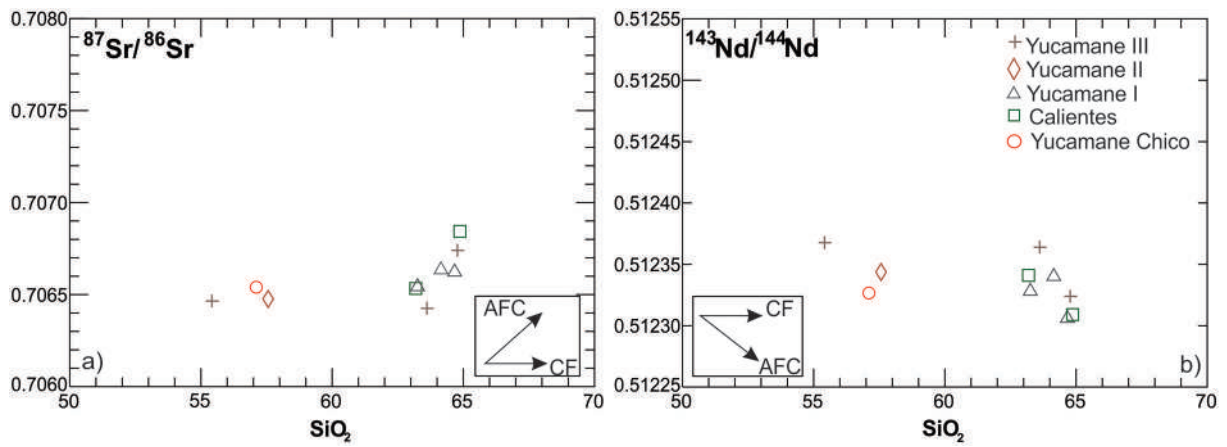


Figura 5.9 Diagramas de variación de composición isotópica de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes. a) Diagrama de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. SiO_2 y b) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. SiO_2 .

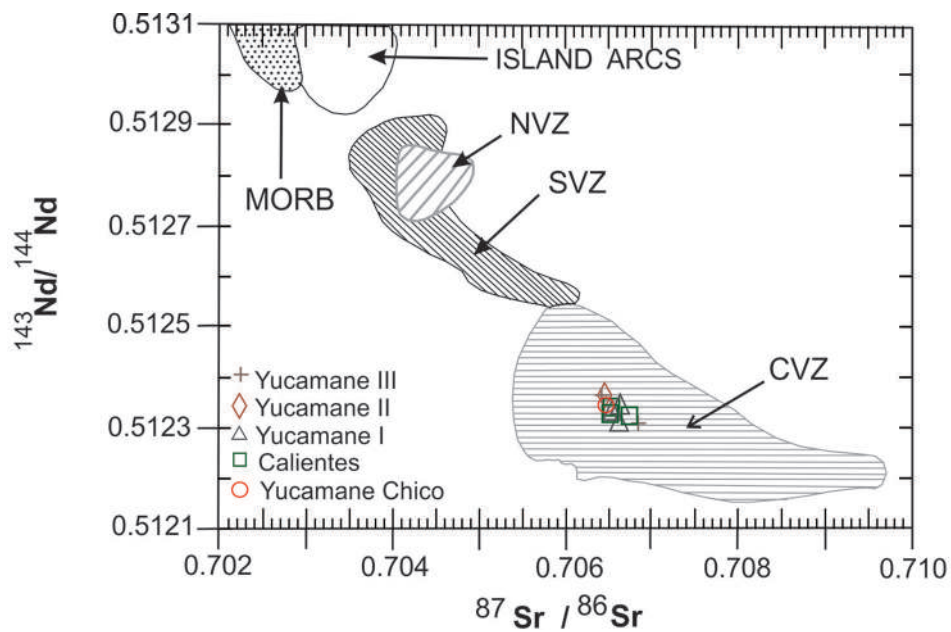


Figura 5.10 Diagrama de composición isotópica de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes, comparadas con los campos composicionales de la zona volcánica del sur (ZVS), centro (ZVC) y Andes del norte (ZVN) (Davidson et al., 1991). Todas las muestras del complejo Yucamane Calientes y el volcán Yucamane Chico caen en el campo de la ZVC.

5.9. EVOLUCIÓN PETROGENÉTICA

El análisis geoquímico de los elementos mayores de las rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes ha permitido poner en evidencia el carácter calcoalcalino del conjunto de rocas, similar a otros magmas generados en la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC), como son por ejemplo los volcanes Misti, Ubinas, Ampato-Sabancaya, entre otros (Thouret et al., 2001; Thouret et al., 2005; Mamani et al., 2010; Rivera et al., 2017; Samaniego et al., 2016).

Por otro lado, en un primer momento, el estudio geoquímico de los elementos mayores y trazas muestra que la evolución de las rocas de dicho complejo volcánico es principalmente controlada por la cristalización fraccionada, como el estudio petrográfico 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 las variaciones de los elementos químicos correspondientes en los líquidos residuales.

La cristalización fraccionada es también puesta en evidencia por las buenas correlaciones lineares existentes entre los elementos incompatibles (por ejemplo contenidos en Rb y Th en función de SiO_2) y compatibles (por ejemplo contenidos en Sr, Co y Ni en función de SiO_2). Los productos de los volcanes Yucamane y Calientes siguen una misma línea de diferenciación que sugiere que los productos tuvieron un proceso de generación y diferenciación magmática similar.

Por otro lado, las rocas del volcán Yucamane Chico son restringidas a un campo limitado de SiO_2 y menos enriquecidos de La, Sm y Sr que las rocas de los volcanes Yucamane y Calientes. En base a estas características, se asume que las rocas de dicho volcán siguieron un proceso de evolución y diferenciación magmática diferente a las rocas del complejo Yucamane-Calientes, lo que sugiere que dichas rocas no pertenecen al mismo sistema magmático del Yucamane-Calientes.

Los datos de isótopos de Sr y Nd de las rocas del complejo Yucamane-Calientes no son compatibles con un proceso de cristalización fraccionada únicamente, ya que los ratios $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ muestran correlaciones positivas con respecto a la SiO_2 (Figura

5.9a), mientras que los ratios $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ muestran correlaciones negativas respecto a la SiO_2 (Figura 5.9b). Estas características sugieren que los magmas del complejo volcánico Yucamane-Calientes evolucionaron a través de un proceso conjunto de asimilación y cristalización fraccionada (AFC) en un reservorio cortical.

Una característica notable del conjunto de rocas del complejo Yucamane-Calientes es la baja concentración en Tierras raras pesadas (HREE) y el gran fraccionamiento entre las Tierras raras ligeras (LREE) y HREE. Estudios efectuados sobre ciertos volcanes de la ZVC, como los volcanes Ollagüe, Parinacota, Payachata, Tata Sabaya, Misti, Huaynaputina (Davidson et al., 1990; Feeley & Hacker, 1995; de Silva et al., 1993) muestran la presencia de magmas pobres en HREE y Y, con relaciones Sr/Y elevados, y con características similares a la serie del complejo volcánico Yucamane-Calientes. El empobrecimiento en Y y HREE en magmas de la ZVC es generalmente atribuido a la asimilación y contaminación de magmas provenientes del manto con aquellos magmas generados en la base de la corteza continental, en presencia del granate o anfíbol en una zona MASH (por sus siglas en inglés: *melting-assimilation-storage-homogenization*), propuesto por Hildreth & Moorbath (1988).

Los magmas de los volcanes Yucamane y Calientes provienen del manto y probablemente en un primer momento se almacenaron "temporalmente" en la base de la corteza (según el modelo propuesto por Hildreth & Moorbath 1988), para luego ascender hacia la superficie y venir a acumularse en un reservorio magmático superficial, donde evolucionaron por un proceso de Asimilación-Cristalización Fraccionada (AFC), tal como lo muestra el comportamiento de los isótopos analizados en este trabajo.

Por su parte, las rocas del volcán Yucamane Chico que también provienen del manto, son ligeramente poco más enriquecidos en tierras raras pesadas (ejemplo, Yb), lo cual sugiere que su origen y evolución ocurrió probablemente antes y/o durante el engrosamiento de la corteza continental en este sector de los Andes centrales.

La pobreza o ausencia de olivino en las rocas indica que el magma que llega a la superficie es evolucionado. Así se puede explicar la ausencia o la rareza de basaltos.

CAPÍTULO VI

EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS VOLCÁNICOS

Una erupción volcánica dependiendo de su magnitud puede ser considerada catastrófica si se produce cerca a zonas pobladas, ya que los productos actúan directa e indirectamente sobre ellas provocando daños y muchas veces dejando víctimas. Los resultados de los estudios geológico-vulcanológicos que se efectúan sobre volcanes activos constituyen la base para descifrar el comportamiento eruptivo pasado, y por medio de la extrapolación, predecir a través de escenarios el comportamiento futuro de un volcán. Desde luego, el punto de partida para la mitigación de los peligros y riesgos volcánicos es una comprensión global de los procesos eruptivos presentados por un volcán.

La evaluación de los peligros volcánicos que se presenta a continuación está basada en el estudio estratigráfico del complejo Yucamane-Calientes, así como el cartografiado geológico de los depósitos volcánicos, el grado de recurrencia de los eventos, el modelamiento de procesos volcánicos y en base a los datos sobre direcciones y velocidades de vientos.

Muchas veces, en la población existe confusión sobre lo que significa **peligro y riesgo**. El **peligro** es la posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural (origen volcánico), de origen tecnológico o provocado por el hombre, que puede manifestarse en un sitio y durante un tiempo de exposición. Para poder cuantificar la probabilidad de que se presente un evento de una u otra magnitud durante un período de exposición, es necesario contar con información la más completa posible acerca del número de eventos que han ocurrido en el pasado y acerca de la intensidad que tuvieron los mismos.

Mientras que el **riesgo** es la probabilidad de pérdidas (vida, propiedad, capacidad productiva) dentro de un área sometida a un peligro (Tilling, 1989; Scott, 1989). Se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Debemos mencionar que la **vulnerabilidad** es una medida del costo susceptible de ser perdido en un evento peligroso dado o la incapacidad de resistencia cuando se presenta un peligro.

Por lo tanto, el riesgo puede ser de carácter vulcanológico, hidrológico, atmosférico, etc., dependiendo de la naturaleza del fenómeno referido. En resumen, para evaluar el riesgo deben

seguirse tres pasos: la evaluación de la amenaza, el análisis de la vulnerabilidad y la estimación del riesgo como resultado de relacionar los dos parámetros anteriores. El INGEMMET, dentro de su ámbito de competencia, realiza principalmente la evaluación del peligro.

6.1 TIPOS DE PELIGROS VOLCÁNICOS

Diversos estudios vulcanológicos han compilado los principales peligros volcánicos, los cuales corresponden a caídas de ceniza y pómez, la ocurrencia de flujos de lava, flujos y oleadas piroclásticas, flujos de escombros (lahares), avalanchas de escombros y gases volcánicos (Blong, 1984; Tilling, 1989; Blong, 2000; Bignami et al., 2012) representados en la Figura 6.1. A continuación se describen estos fenómenos para el caso del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

6.1.1 Peligros por caídas de tefras

Constituyen el peligro directo de mayor alcance; se ligan a erupciones explosivas como las vulcanianas, subplinianas o plinianas. Las tefras están constituidas por pómez, escoria y/o ceniza que han sido expulsadas hacia la atmósfera por medio de las columnas eruptivas y que luego caen sobre la superficie. La altura de la columna eruptiva está determinada por la tasa y velocidad de emisión, por el contenido de gases en el magma, entre otros. Los factores citados y la dirección del viento controlan el transporte de tefras a grandes distancias (Bignami et al., 2012; Tilling, 1989; Blong, 1984).

En caso de una eventual reactivación del volcán Yucamane o Calientes, en función de la magnitud de la erupción, las tefras emitidas causarían impacto en la población, ganado, tierras de cultivo, construcciones (viviendas, colegios, centros de salud, etc.) y en las obras de infraestructura (reservorios de agua, canales de agua, carreteras, etc.). Desde luego, existe una mayor posibilidad de que el volcán Yucamane se reactive respecto al volcán Calientes, ya que el Yucamane presenta actividad más reciente que el volcán Calientes.

Al menos la provincia de Candarave está sujeta a dos tipos de peligros por la emisión de tefras en caso de una erupción explosiva de cualquiera de los dos volcanes, Yucamane o Calientes:

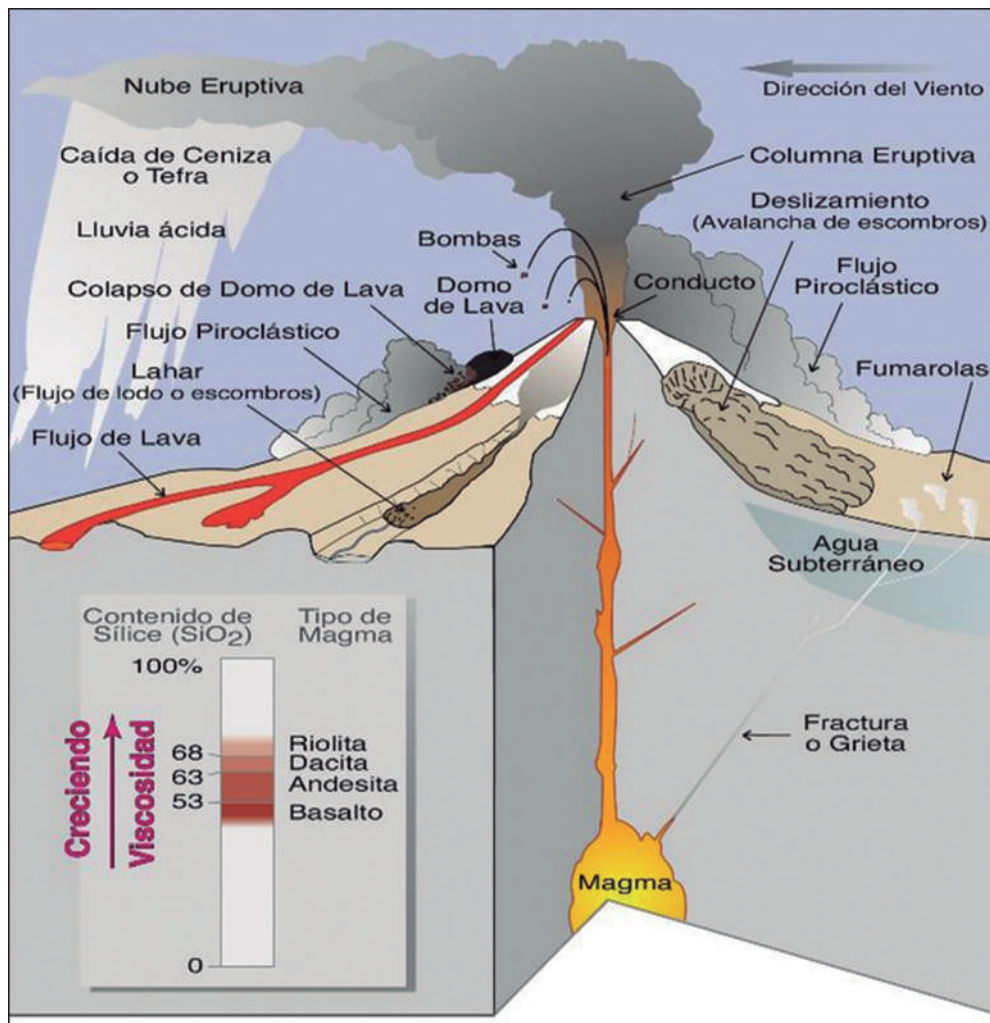


Figura 6.1 Tipos de peligros volcánicos que puede presentar un estratovolcán como el volcán Yucamane (Fuente USGS).

- a) En caso de erupciones moderadas a importantes con IEV 2-3: existen peligros por emisiones de ceniza y/o lapilli de pómez, pues estos pueden alcanzar distancias mayores a 20 km de cualquiera de los dos volcanes.
- b) Peligros por proyectiles balísticos: estos están supeditados a un radio aproximado de 4 km alrededor del volcán, en caso de erupciones explosivas moderadas (IEV 2-3), pero la distancia que alcancen los proyectiles balísticos puede ser mayor durante las erupciones explosivas violentas (IEV 4-6).

Estas hipótesis están basadas por la presencia de escoria y lapilli de pómez recientes que yacen al pie de los flancos sureste y este del volcán Yucamane, así como por la presencia de los bloques balísticos de 3 m de diámetro localizados a 0.5 km al

oeste del cráter del Yucamane.

Los escenarios de este tipo de peligro por emisión de tefras serán descritos más adelante.

6.1.2 Peligros por flujos y oleadas piroclásticas

Los flujos piroclásticos pueden ser generados de la siguiente manera:

- Por el colapso de una columna eruptiva durante una erupción vulcaniana, subpliniana o pliniana, que puede generar flujos de pómez y ceniza, flujos de escorias o flujos de ceniza.
- Por el colapso de domos en crecimiento que genera flujos piroclásticos de bloques y ceniza.
- Por las explosiones freatomagmáticas

- d) Por una explosión lateralmente dirigida que genera flujos de ceniza o flujos de pómez y ceniza.

Los flujos piroclásticos están conformados por fragmentos de roca, ceniza y gases que tienden a canalizarse dentro de los valles. Se movilizan al ras del suelo, a velocidades que superan los 300 km/h, así como a altas temperaturas (de 300 a 800 °C) (Nakada, 2000). Estos flujos representan los eventos volcánicos más peligrosos y letales. Como ejemplo de su poder destructivo podemos citar lo ocurrido en el año 1902, durante la erupción del volcán Montaña Pelée (Martinica), donde flujos piroclásticos causaron la muerte de más de 30 mil personas y la destrucción total de la ciudad de Saint Pierre (Fisher & Heiken, 1982).

Durante una eventual erupción explosiva del volcán Yucamane o Calientes pueden generarse flujos piroclásticos, los cuales pueden recorrer distancias mayores a 6 km del volcán, como el presentado por el volcán Yucamane durante el Pleistoceno superior y el Holoceno (por ejemplo la erupción de hace 3270 años AP). Los flujos piroclásticos generados por el **volcán Yucamane** rellenarían cauces de quebradas y ríos, como la quebrada Honda y los ríos Callazas y Calientes-Salado; afectarían centros poblados (Santa Cruz, Yucamane Pampa, Patapatani), obras de infraestructura (canales de agua, reservorios de agua) y terrenos de cultivos, principalmente localizados al pie del flanco suroeste, sur y sureste del volcán. De igual manera, los flujos piroclásticos generados por el **volcán Calientes** rellenarían cauces de quebradas y ríos, como las quebradas Curancurane y Gentilcahua, y los ríos Callazas y Calientes-Salado. Afectarían al poblado de Yucamane Pampa, estancias, obras de infraestructura (canales de agua, reservorios de agua) y terrenos de cultivos, principalmente localizados al pie del flanco oeste y este del volcán Calientes.

La ocurrencia de estos procesos está basada en la presencia de variados depósitos de **flujos de bloques y ceniza** que tienen entre 2 a 12 m de espesor, canalizados en las quebradas que descienden por los flancos sur y suroeste del volcán Yucamane (quebradas Gentilcahua, Honda y Campanani), localizados entre 6 y 9 km del cráter. También se basa en la presencia de un potente depósito de **flujos de escorias** que yace en las quebradas Gentilcahua y Condorcahua, localizadas al pie del flanco sur y SO del Yucamane (a 4 y 8 km del volcán, respectivamente), donde tienen entre 2 y 10 m de espesor. Finalmente, también se basa en la presencia de un **flujo de pómez y ceniza** que se localiza a 7 km al este del cráter del Yucamane y tiene 4 m de espesor.

La ocurrencia de oleadas piroclásticas en una próxima erupción del volcán Yucamane o Calientes está basada en los depósitos de **oleada piroclásticas** registrados en otros volcanes andesíticos considerados análogos, como el volcán Misti.

6.1.3 Peligros por flujos de barro (lahares)

Los lahares son mezclas de productos volcánicos, removilizados por el agua, que fluyen rápidamente por las quebradas que surcan los flancos de un volcán. Los lahares pueden ocurrir durante o después de una erupción.

Lahares sineruptivos (producidos durante una erupción) pueden generarse por la explosión de una napa freática al interior del cráter; así como por fuertes lluvias que removilizan todo el material volcánico que yace en las laderas de un volcán y/o por la interacción de un flujo de lava o flujo piroclástico que funde la nieve o hielo que permanece en la cumbre o los flancos de un volcán. Un ejemplo de esto último ocurrió en Armero (Colombia), en el año 1985 (Lowe et al., 1986), donde una erupción explosiva de tamaño moderado (IEV 3, Thouret, 2005) fundió la cobertura de hielo que permanecía en la cima de este volcán, lo que ocasionó la muerte de más de 25 mil personas.

El volcán Yucamane es más propenso a la ocurrencia de lahares que el volcán Calientes, ya que en la cima del primero existe nieve y/o hielo la mayor parte del año (diciembre-julio).

Durante los meses de diciembre a julio, en la cumbre del volcán Yucamane, se acumula hielo y nieve con un promedio de 50 cm de espesor que cubre un área de 4 a 6 km² (con un volumen de 0.002 km³, aproximadamente). Los fragmentos piroclásticos de una erupción explosiva futura pueden interactuar y a la vez fundir el hielo y la nieve para luego generar lahares. Estos se desplazarían desde la parte alta por las diversas quebradas que surcan los flancos, sobre todo por aquellos ubicados al SO, S y SE del volcán. Esta distribución está basada en la presencia de los diversos depósitos que se encuentran canalizados en las quebradas que drenan por el flanco sur del volcán Yucamane (Qda. Honda, Campanani, Queñua, río Callazas, etc.) y también en las que se hallan intercaladas en las secuencias volcánicas del Yucamane. Conforme se desplazaran estos flujos de barro, se iría incorporando gran cantidad de materiales sueltos esparcidos en los flancos y las quebradas que descienden del volcán.

6.1.4 Peligros por avalanchas de escombros

Las avalanchas de escombros se generan por el colapso de un sector del volcán, debido a erupciones explosivas de gran magnitud, por la intrusión de domos, por la poca resistencia de las rocas del basamento debido al peso del volcán, por la pendiente elevada del volcán, por el grado de alteración hidrotermal de sus rocas, por una actividad sísmica importante, etc. (Ui et al., 2000). A mayor volumen, las avalanchas de escombros se desplazarían a mayor velocidad y a mayor distancia. En el caso del monte St. Helens (USA), la avalancha

generada se desplazó a una velocidad que varió entre 113 y 240 km/h (Brantley & Myers, 1997).

Las avalanchas de escombros, entierran y destruyen todo lo que encuentran a su paso, adicionalmente pueden generar lahares y crecientes a partir del desagüe de agua represada por la avalancha (Tilling, 1989).

Al sur del volcán Yucamane, en el sector de Santa Cruz, afloran depósitos de avalanchas de escombros probablemente ligados al colapso parcial del volcán Yucamane o Calientes. El volcán Calientes tuvo un cono cuyo sector este ha colapsado probablemente en el Holoceno (según correlaciones estratigráficas), y los depósitos resultantes aparentemente estarían cubiertos por secuencias piroclásticas visibles en el sector de Cambaya.

Desde luego, el más propenso a presentar avalancha de escombros es el volcán Yucamane, respecto al volcán Calientes, ya que el primero presenta un cono más voluminoso con pendientes más elevadas. Detalles sobre los efectos de las avalanchas en el medio ambiente y los poblados se discutirá más adelante, en el ítem 6.2.3.

6.1.5 Peligros por flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida, que son expulsadas por el cráter o por las fracturas en los flancos del volcán. Pueden fluir por el fondo de los valles y alcanzar varios kilómetros de distancia; raramente llegan a recorrer más de 8 km del centro de emisión (Francis, 1993). En los volcanes de la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes, las lavas son viscosas y normalmente se enfrían en la zona del cráter; estas forman domos o recorren algunos kilómetros de distancia.

Los flujos de lava calcinan y destruyen todo a su paso; sin embargo, no representan un peligro alto para las personas debido a su baja velocidad (Tilling, 1989), pues da tiempo para evacuar o escapar. Sin embargo, si interaccionara con la nieve que permanece en la cima del volcán, podría generar lahares o flujos de lodo que descenderían por los flancos del volcán.

6.2 ESCENARIOS ERUPTIVOS ANTE UNA POSIBLE REACTIVACIÓN DEL VOLCÁN YUCAMANE

El cartografiado geológico y el estudio estratigráfico del complejo volcánico Yucamane-Calientes muestran que las secuencias volcánicas del volcán Yucamane yacen sobre las secuencias volcánicas del volcán Calientes, sugiriendo que el volcán Calientes inició su actividad eruptiva mucho antes que el volcán Yucamane. Durante el Holoceno, los dos volcanes mostraron actividad eruptiva. Desde luego, según los datos geológicos

presentados anteriormente, el volcán Yucamane ha sido más activo durante los últimos milenios. En tal sentido, se sugiere que *el más probable* a reactivarse en el futuro es el volcán Yucamane, desde luego, sin descartar una eventual reactivación del volcán Calientes.

Para la elaboración de los escenarios eruptivos, se ha considerado la presencia de los depósitos antes descritos, así como los resultados de dataciones radiométricas de los productos y otros aspectos descritos a continuación:

- Los tipos de dinamos eruptivos reconocidos en el Yucamane y Calientes, los cuales podrían volver a repetirse.
- La magnitud de las erupciones del volcán Yucamane y Calientes, inferida en función del volumen de material emitido y por el área cubierta.
- El comportamiento de otros volcanes peruanos u otros de la zona volcánica central de los Andes, considerados como «análogos» a los volcanes Yucamane y Calientes.

Se definieron cinco escenarios eruptivos ante una posible erupción del volcán Yucamane, los cuales se detallan a continuación.

6.2.1 Primer escenario: Erupción vulcaniana (IEV 1-2)

Las erupciones vulcanianas son erupciones explosivas moderadas a leves que emiten materiales como ceniza, proyectiles balísticos, bloques, bombas y eventualmente lapilli de pómez. Las explosiones se dan en intervalos de minutos a horas e incluso días. Luego de las explosiones se generan columnas de gases y ceniza de menos de 20 km de altura (Sigurdsson, 2000). Incluso a veces emplazan flujos piroclásticos. La ceniza emitida puede ser dispersada a algunas decenas de kilómetros de distancia, e incluso sobrepasar fácilmente los 30 km de distancia. En el sur peruano, los volcanes Misti, Ubinas, Sabancaya y otros han presentado erupciones vulcanianas con IEV 1-2 (Rivera et al., 2014; Thouret et al., 2001; Gerbe & Thouret, 2004).

También es frecuente la formación de lahares durante la ocurrencia de este tipo de erupciones, sobre todo si ocurre en temporada de lluvia, pues en esa época los volcanes poseen una cobertura de hielo y nieve.

Los estudios de tefrocronología realizados en el volcán Yucamane nos permitieron identificar por lo menos tres depósitos de caída de escoria andesítica ligados a erupciones vulcanianas o subplinianas. Estos depósitos fueron emplazados hace más de 3270 años AP. Sin embargo, en el volcán Calientes no se ha logrado identificar algún depósito de caída.

Las crónicas mencionan la ocurrencia de dos erupciones

explosivas moderadas presentadas por el Yucamane en los años 1802 (con IEV 3) y 1780 (con IEV 2), que según la descripción de los sucesos, ¿podrían corresponder a erupciones vulcanianas? Sin embargo, en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes no se han distinguido dichos depósitos de ceniza. Por lo que pensamos que estos relatos corresponderían a erupciones del volcán Tutupaca, ya que estudios recientes efectuados por Samaniego et al. (2015) muestran que el volcán Tutupaca presentó actividad eruptiva en aquel periodo, es decir hace 218 ± 14 años AP.

En caso de que el volcán Yucamane, o eventualmente el Calientes, presentara una erupción vulcaniana con Índice de Explosividad Volcánica (IEV) 1 o 2, entre noviembre a marzo, las caídas de ceniza viajarían preferencialmente al O y SO, y afectarían a poblados como Candarave, San Pedro y Yucamane Pampa, así como a los terrenos de cultivo, ganado camélido, canales de agua, etc. Pero si la erupción ocurriese entre los meses de abril a octubre, la ceniza se dispersaría preferencialmente al E y SE, y afectaría a poblados como Santa Cruz y otros, localizados entre 8 y 30 km del cráter del Yucamane; en menor medida, la ceniza se desplazaría al oeste.

Si la erupción del Yucamane o Calientes ocurriera en época de lluvias (diciembre-abril) podría incluso generar lahares. Esto se basa en la presencia de lahares con espesores centimétricos a métricos en quebradas que drenan de los volcanes Yucamane y Calientes, como aquellas situadas a más de 7 km al sur y SO del cráter del Yucamane (Quebradas Gentilcagua, Honda, Campanani), que corresponden a lahares de pequeño volumen, posiblemente de 0.5 a 1 millón de m³. Estos lahares posiblemente estén asociados a las erupciones vulcanianas ocurridas durante el Holoceno.

Durante erupciones vulcanianas ligeramente explosivas (IEV 2), también podrían generarse flujos piroclásticos de poco volumen y limitado alcance (Sigurdsson, 2000). Dependiendo de la topografía del terreno, estos flujos alcanzarían hasta 8 km del cráter, lo que afectaría la vida de algunos pobladores que habitan en áreas proximales al volcán.

6.2.2 Segundo escenario: erupción vulcaniana o subpliniana (IEV 3)

Durante erupciones de tipo vulcaniano o subpliniano, con IEV 3, las columnas de ceniza alcanzarían entre 3 y 20 km de altura sobre el cráter, y generarían depósitos de caída de ceniza y flujos piroclásticos (Sigurdsson, 2000). La ceniza puede ser dispersada a algunas decenas de kilómetros de distancia e incluso sobrepasar fácilmente los 30 km, como ocurrió durante la erupción del volcán Nevado del Ruiz (1985, IEV 3), donde las isópacas de 1 cm alcanzaron hasta 35 km de distancia de

la fuente (Naranjo et al., 1986). En este tipo de erupciones se pueden generar flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, etc. que serían canalizados en quebradas y valles aledaños al volcán.

La mayoría de volcanes del sur del Perú han presentado este tipo de proceso. En el volcán Yucamane se han encontrado depósitos de caída de lapilli de pómez y caídas de escoria asociados a erupciones subplinianas o vulcanianas con IEV 3. En efecto, la última erupción subpliniana del Yucamane ocurrió hace ~3270 años AP; esta depositó una capa de caída de lapilli de pómez de 50 cm de espesor, a 2 km al pie del flanco SE y este del volcán. Asimismo, se han reconocido al menos dos depósitos de caída de escoria asociados posiblemente a erupciones subplinianas ocurridas hace más de 3270 años AP. Mientras que en el volcán Calientes, no se ha reconocido ningún depósito de caída piroclástica emitido por dicho volcán. En tal sentido, la posibilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas y subplinianas con IEV 3 es de moderada a alta posibilidad en el volcán Yucamane.

En caso de que el Yucamane, o en menor medida el Calientes, presentase una erupción subpliniana en verano (noviembre a marzo), las cenizas viajarían preferencialmente al oeste, y afectarían poblados como Candarave, San Pedro, entre otros, localizados al SO del volcán. Sin embargo, si una erupción subpliniana ocurriera entre los meses de abril a octubre, las cenizas viajarían preferencialmente al E y SE, y afectarían al poblado de Santa Cruz, Calleraco y otros poblados menores localizados entre 8 y 40 km del Yucamane.

Durante las erupciones subplinianas también pueden producirse flujos piroclásticos. En efecto, durante la erupción subpliniana presentada por el Yucamane hace aproximadamente 3270 años AP, este volcán emitió flujos de pómez y ceniza emplazados hasta 6 km al noreste de su cráter. Sin embargo, dependiendo de la topografía del terreno, estos flujos podrían alcanzar mayores distancias.

Las erupciones vulcanianas y subplinianas (IEV 3) también pueden generar lahares, especialmente si los flujos y oleadas piroclásticas se emplazan sobre la cobertura de hielo o nieve (Major & Newhall, 1989), como ocurrió durante la erupción del volcán Nevado del Ruiz en Colombia, en 1985, que tuvo un IEV 3 (Thouret et al., 1990; Pierson et al., 1990). Una erupción vulcaniana o subpliniana (IEV 3) del Yucamane o Calientes generaría lahares que descenderían por las diversas quebradas que surcan los flancos del complejo volcánico Yucamane-Calientes, sobre todo por aquellos ubicados al S y SE del Yucamane. Esta versión está basada en la presencia de los diversos depósitos que se encuentran en las quebradas localizadas en el flanco sur del volcán Yucamane (Quebradas Honda, Campanani, Queñua, etc.).

6.2.3 Tercer escenario: crecimiento de domo y/o explosión dirigida (Blast)

Un domo se forma cuando el magma es demasiado viscoso para fluir más de unas decenas o cientos de metros (Francis, 1993). Durante el crecimiento, los flancos de dicho domo son inestables y pueden colapsar o explotar, y dar lugar a la formación de flujos piroclásticos. La mayor amenaza asociada a domos de lava radica en los flujos piroclásticos producidos por explosiones o colapsos. Estos flujos pueden producirse sin previo aviso y desplazarse a velocidades mayores a 50 m/s y mayores a 10 km de su fuente (Millar, 1989).

En el Yucamane o Calientes, es probable la formación de un domo, ya que en inmediaciones de estos volcanes existen depósitos de flujos de bloques y ceniza ligados al crecimiento y destrucción de domos producidos por dichos volcanes. En efecto, en la parte baja del volcán Yucamane (quebrada Honda e inmediaciones de las localidades de Yucamane Pampa, Patapatani y Santa Cruz) existen depósitos de flujos de bloques y ceniza ligados al crecimiento y destrucción de domos generados por dichos volcanes.

Asimismo, existe un depósito de flujo piroclástico tipo *blast* datado en 36450 ± 250 ka que ha viajado a más de 15 km al oeste del volcán, que mide 20 cm de espesor. El crecimiento y colapso de un domo en el Yucamane o Calientes puede generar flujos incandescentes de bloques y cenizas que pueden emplazarse en las diversas quebradas aledañas a dichos volcanes. También el crecimiento de un domo al interior de cualquiera de los dos volcanes puede desencadenar el colapso del edificio volcánico asociado a una explosión lateral dirigida (*blast*), que afectaría a amplios sectores del volcán, y alcanzaría distancias de hasta decenas de kilómetros.

En caso de una erupción violenta del volcán Yucamane o si se produjera el crecimiento de un domo al interior de dicho volcán, uno de los flancos podría colapsar y generar depósitos de avalancha de escombros que se desplazarían hasta una distancia mayor a 8 km del volcán. Esto según cálculos de líneas de energía y la distancia recorrida por depósitos preexistentes. Si estos depósitos ingresaran a los ríos Calientes o Callazas podrían transformarse en lahares.

Igualmente, si el volcán Calientes presentara una erupción violenta o si se produjera el crecimiento de un domo al interior de dicho volcán, uno de los flancos del sector oeste del Calientes o el complejo de domos podría colapsar y generar depósitos de avalancha de escombros que también se desplazarían hasta una distancia mayor a 6 km del volcán, principalmente en dirección este y oeste del volcán. Si estos depósitos ingresaran a los ríos Calientes o Callazas se transformarían en lahares.

La hipótesis sobre la generación de avalanchas de escombros está basada en la existencia de un depósito de avalancha de escombros del Pleistoceno que aflora en el sector de Santa Cruz, probablemente ligado al colapso parcial del volcán Yucamane o Calientes.

6.2.4 Cuarto escenario: erupción efusiva con emisión de lavas

Una erupción efusiva consiste en la emisión pasiva de flujos de lava. El volcán Yucamane, al igual que el volcán Calientes, durante el pasado, ha emitido principalmente lavas de composición andesítica y dacítica; es decir, moderadamente viscosas, cuyas velocidades de efusión o desplazamiento no superaron los metros cúbicos por segundo. Estos flujos de lava alcanzaron menos de 5 km de distancia de la fuente (Francis, 1993).

Actualmente, si se produjera una erupción efusiva, las lavas serían similares a las emitidas en épocas anteriores, es decir de composición andesítica y/o dacítica. En el caso del volcán Yucamane, dichas lavas emitidas tendrían que rellenar el cráter, para luego desplazarse por los flancos del volcán. Para que ocurra este proceso, las lavas deberían sobrepasar un volumen mayor a 0.2 km^3 y desde luego no recorrerían mucha distancia a partir del cráter (menos de 6 km); se podría predecir su curso. En el caso del volcán Calientes, las lavas recorrerían libremente por los flancos del volcán y del domo, para canalizarse por algunas quebradas que drenan de dicho volcán.

Los flujos de lava causarían daños por incendio, impacto e incineración, y consecuentemente enterrarían todo lo que encuentren a su paso. Sin embargo, rara vez amenazarían la vida de los pobladores, ya que al pie del volcán no hay la presencia de habitantes.

Asociado a cualquier erupción efusiva, puede presentarse el descongelamiento de la nieve que se encuentra eventualmente entre los meses de diciembre a marzo en la cumbre del volcán y, en consecuencia, puede dar lugar a la formación de flujos de lodo o lahares. Estos flujos de barro al recorrer las partes bajas serían más peligrosos que las lavas.

6.2.5 Quinto escenario: erupción pliniana (IEV 4-5)

Las erupciones plinianas son las erupciones explosivas más violentas debido a que el magma, en la mayoría de los casos, es ácido y posee alto contenido de gases. Las columnas eruptivas constituidas de ceniza, lapilli de pómez y gases suelen alcanzar alturas mayores a los 20 km y los materiales emitidos pueden afectar más de 800 km^2 (Cas & Wright, 1987). Durante estas

erupciones se generan voluminosas caídas de lapilli de pómez y ceniza. Asimismo se pueden generar flujos piroclásticos de pómez y ceniza, y oleadas piroclásticas. También es frecuente encontrar decenas de lahares asociados a este tipo de erupciones a cientos de kilómetros.

En el sur del Perú, los volcanes Misti, Ubinas, Ticsani, Huaynaputina y Ampato han presentado erupciones plinianas (Rivera et al., 2014; Mariño & Thouret, 2003; Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011; Samaniego et al., 2016). La erupción de hace 2000 años AP del volcán Misti fue de tipo pliniano (IEV 5; Harpel et al., 2011), que generó un depósito de caída de pómez que tuvo un volumen de aproximadamente 1.4 km³. Este depósito tiene entre 10 a 20 cm de espesor en toda el área de Arequipa (a más de 12 km de distancia del cráter del volcán). Asimismo, la erupción generó flujos piroclásticos de pómez y ceniza que en total tuvieron un volumen de 0.01 km³. Estos depósitos poseen espesores métricos, a más de 11 km de distancia del cráter. Además, la erupción generó depósitos de lahares que alcanzaron más de 20 km de distancia (Harpel et al., 2011). En el caso del volcán Ubinas, la última erupción pliniana ocurrió hace 980 años AP y emplazó depósitos de caída de ceniza de hasta 25 cm de espesor a más de 40 km del cráter (Rivera et al., 1998).

Las erupciones plinianas del Yucamane son poco comunes, mientras que en el volcán Calientes no hemos distinguido depósitos asociados a este tipo de erupciones. En tal sentido, la posibilidad de ocurrencia de una erupción pliniana en el Yucamane es baja, mientras que en el Calientes es aún más baja. En caso de la ocurrencia de una erupción pliniana en el Yucamane o Calientes, las tefras expelidas viajarían principalmente al este (diciembre-marzo) o al E y SE (abril a noviembre), a más de 80 km de distancia, y causarían impacto en los poblados, ganados, tierras de cultivo, obras de infraestructura (reservorios de agua, canales, etc.), localizados en sus inmediaciones. Los poblados más afectados serían aquellos ubicados en las provincias de Candarave y Tarata. Igualmente, durante la erupción, se generarían flujos piroclásticos que podrían recorrer distancias mayores de 6 km del volcán, mayor a lo ocurrido durante la erupción subpliniana del Yucamane de hace 3270 años AP. Estos flujos afectarían centros poblados cercanos al volcán (Santa Cruz, Yucamane Pampa, Patapatani), obras de infraestructura (canales de agua, etc.) y terrenos de cultivo, localizados cerca del volcán.

Las erupciones plinianas también podrían generar lahares en el Yucamane, especialmente si los flujos y oleadas piroclásticas se emplazaran sobre la cobertura de hielo o nieve presente en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo en la cumbre del volcán, lo cual podría originar su fusión (Major & Newhall,

1989). Los lahares pueden descender por las quebradas que drenan del volcán Yucamane hacia los ríos Callazas y Calientes, e incluso por quebradas que drenan por los volcanes Calientes y Yucamane Chico, y causar graves daños en terrenos de cultivo, carreteras, puentes, etc. Durante una erupción pliniana, el alcance de los lahares sería mayor de 30 km, lo que implicaría llenar de sedimentos la laguna Aricota.

6.3 MAPA DE PELIGROS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO YUCAMANE-CALIENTES

Se han elaborado tres mapas de peligros que consideran una erupción potencial de los volcanes Yucamane y Calientes. Estos mapas muestran una integración de dos o más tipos de peligros volcánicos. En efecto, se presenta un mapa principal para peligros múltiples de la zona proximal (peligros por flujos piroclásticos, flujos de lava y eyección de proyectiles balísticos). Asimismo, se presenta un segundo mapa de peligros por lahares y avalanchas de escombros para áreas mediales y distales, y un tercer mapa de peligros por caídas piroclásticas o de tefras. Estos tres mapas son presentados dentro de un solo formato A0, para una mejor visualización e interpretación de los peligros (ver mapa de peligro).

Para delimitar las zonas de alcance de los flujos piroclásticos, lahares y avalanchas de escombros se utilizó el programa LAHARZ_py (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998) y datos de campo sobre áreas cubiertas con erupciones pasadas. El programa LAHARZ_py se ejecuta dentro de un Sistema de Información Geográfica (GIS) y un Modelo de Elevación Digital (DEM). El DEM empleado ha sido elaborado en base a mapas topográficos a escala 1/25 000. También se consideran para los lahares varios escenarios de volúmenes previamente establecidos, y para los flujos piroclásticos y avalanchas de escombros se utilizan estimaciones de las relaciones H/L (H: altura; L: distancia horizontal), que corresponden a la movilidad de un flujo o avalancha respecto a la distancia (Malin & Sheridan, 1982).

A continuación se describen dichos mapas.

6.3.1 Mapa proximal de peligros volcánicos múltiples

La zonificación de peligros (alto, moderado y bajo) en el mapa principal se realizó para el emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de lava y eyección de proyectiles balísticos. El mapa está a una escala 1/50 000 (Figura 6.3).

Fueron integradas las zonas de alto, moderado y bajo peligro determinadas para los flujos piroclásticos, los flujos de lava y los proyectiles balísticos; producto de esta integración se tiene

el mapa principal que considera peligros múltiples (ver mapa de peligro).

Zonificación de peligros de la zona proximal

Para la delimitación del alcance de los flujos piroclásticos en los flancos del complejo volcánico, se empleó la metodología denominada "cono de energía" (Malin & Sheridan, 1982), que ha sido muy utilizada para definir las zonas de peligro proximales alrededor de un volcán. Este método postula que el alcance horizontal (L) de un flujo piroclástico es función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo o la cima de un volcán y el punto de alcance del depósito (Figura 6.2).

La relación H/L es un indicador de la movilidad del flujo. Así, para una relación H/L cercana a 0.1, los flujos poseen gran movilidad y por tanto alcanzan mayor distancia, mientras que para una relación H/L cercana a 0.3, poseen poca movilidad. Los alcances de los flujos piroclásticos fueron delimitados con el programa LAHARZ_py.

Para realizar el modelamiento con el software LAHARZ_py se introdujo valores de distancia "L" (distancia a recorrer por el flujo) y una altura "H" (distancia tomada a partir de la cumbre del volcán desde donde descienden los flujos piroclásticos hasta el fondo del valle), y se calculó la relación H/L.

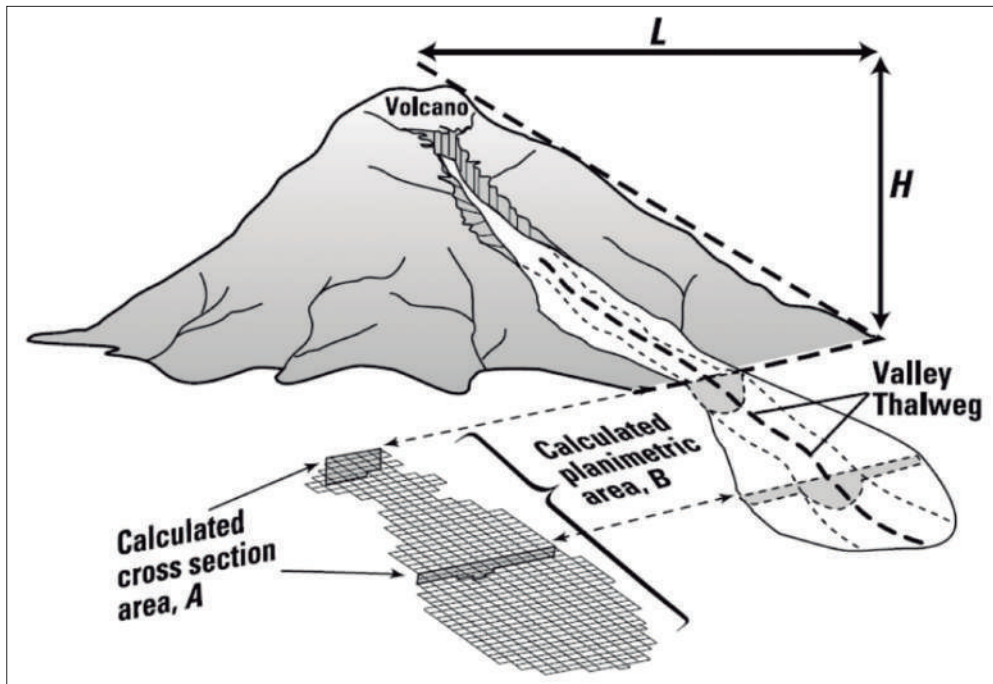


Figura 6.2 Relaciones entre la distancia L y la altura H por donde recorrerán los lahares; así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un evento lahárico (Schilling, 1998).

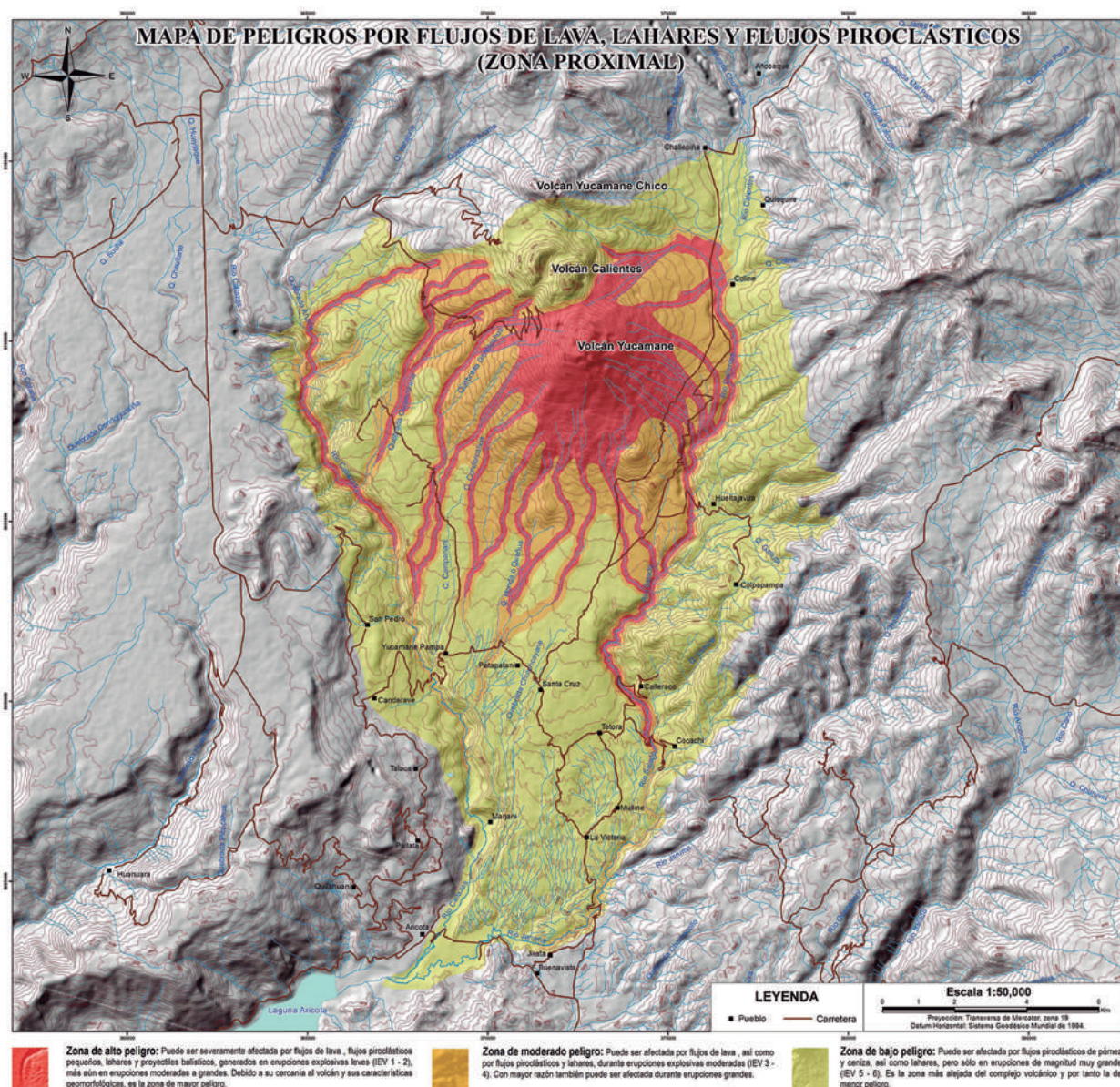


Figura 6.3 Mapa proximal de peligros volcánicos múltiples del complejo Yucamane-Calientes

Zona de alto peligro (rojo)

Para delimitar la zona de alto peligro, se utilizó el valor 0.5 para la relación H/L, calculado a partir de nuestros datos de campo. Este valor obtenido es frecuente para flujos piroclásticos de escoria de volumen pequeño, generados durante erupciones con IEV 1-2, como en el caso del **Escenario 1 (erupción vulcaniana)**. Se consideraron como centros de emisión los cráteres de los volcanes Yucamane y Calientes. Como se ha mencionado anteriormente, la probabilidad de ocurrencia de erupciones vulcanianas es mayor en el Yucamane, debido a que ocurrió

de manera recurrente durante el Holoceno; mientras que en el volcán Calientes la posibilidad de ocurrencia es menor.

Los límites de los flujos piroclásticos de volumen pequeño se encuentran entre 1 y 6 km de distancia de los cráteres de ambos volcanes (Figura 6.3, y también mapa de peligros). En efecto, las mayores distancias (3-6 km del cráter) se encuentran en los sectores sur, sureste, este y noreste del volcán Yucamane, mientras que las menores distancias (1-2 km del cráter) están al pie de los flancos sur y norte del volcán Calientes, y norte del volcán Yucamane.

Los alcances bajos son frecuentes en erupciones vulcanianas pequeñas. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Tungurahua en el 2006 (Ecuador), se generaron flujos piroclásticos que se emplazaron por las quebradas de los flancos sur y sureste, que recorrieron distancias cercanas al volcán (Hall et al., 2013).

Los límites de la zona de alto peligro obtenido también coinciden con el alcance de un gran número de flujos de lavas del Yucamane (nuestro **Escenario 4**), que se encuentran entre los 3 y 5 km de distancia desde su punto de emisión (Figura 3.18). Por otro lado, los proyectiles balísticos generados durante erupciones vulcanianas (IEV 1-2) han alcanzado distancias limitadas a las zonas muy proximales al cráter, típicamente menores a 3 km, en varios volcanes del sur peruano. Por ejemplo, durante la erupción del volcán Ubinas 2006-2009, el alcance máximo de proyectiles balísticos fue cercano a 2.5 km (Rivera et al., 2010), y durante la última erupción del volcán Sabancaya 1990-1998 alcanzó menos de 1 km del cráter (Thouret et al., 1994).

En resumen, la zona de alto peligro (rojo) se encuentra entre 1 y 6 km de distancia, puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones pequeñas a moderadas con IEV 1-2 por flujos de lava muy viscosas y por proyectiles balísticos.

Zona de moderado peligro (naranja)

Para delimitar la zona de moderado peligro, se consideró el valor 0.4 para la relación H/L. Estos valores son frecuentes para flujos piroclásticos de escoria y flujos de pómez y cenizas de volumen moderado, generados durante erupciones subplinianas con IEV 3, como en el **Escenario 2**. En el gráfico de Sigurdsson (2000), que relaciona la altura (H) versus distancia recorrida (L) para varios flujos piroclásticos, el valor de H/L para flujos densos se encuentra entre 0.2 y 0.5. En este escenario también se consideró como centros de emisión los cráteres de ambos volcanes: Yucamane y Calientes.

Se consideró este escenario, ya que al pie de los flancos este y noroeste de dicho volcán se encuentran depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza emitidos por el volcán Yucamane hace 3270 años AP. También erupciones de este tipo han sido frecuentes en algunos volcanes del sur peruano, como la erupción del volcán Ubinas del año 1667 d.C., que emplazó flujos de escoria (IEV 3, Thouret et al., 2005).

En caso de que el Yucamane presente este tipo de erupciones, los límites de alcance de los flujos piroclásticos se encuentran entre 3 y 8 km de distancia al sureste, suroeste, oeste, este y sur del cráter del volcán Yucamane; y de 2 a 3 km de distancia al noroeste, noreste y norte de dicho volcán (ver mapa de peligros).

En este último caso, la distancia alcanzada es menor respecto a la primera, ya que es limitada por el flanco sur del volcán Calientes que actúa como una "barrera" topográfica.

En caso de que el volcán Calientes presente este tipo de erupción, los límites de alcance de los flujos piroclásticos se encuentran entre 3 y 7 km de distancia al pie de los flancos este y oeste del domo volcán Calientes, y de 2 a 3 km de distancia en los flancos norte y sur de dicho volcán (ver mapa de peligros). En este último caso, la distancia alcanzada es menor respecto a la primera, ya que es limitada por el flanco norte del volcán Yucamane y flanco sur del volcán Yucamane Chico, que actúan como «barreras» topográficas.

Los límites de la zona de moderado peligro también coincide con los máximos alcances de algunos flujos de lava emitidos por el volcán Yucamane, que se encuentran alrededor de 5 km de distancia desde su punto de emisión. Por otro lado, el alcance máximo de proyectiles balísticos se encuentra dentro de un radio menor a 3 km, según datos tomados de Blong (1984). Esta distancia se encuentra dentro de los límites de la zona de moderado peligro.

En resumen, la zona de moderado peligro (naranja) que se encuentra entre 3 y 8 km de distancia con respecto a los cráteres de los volcanes Yucamane y Calientes puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones explosivas con IEV 3, por flujos de lavas voluminosas (que poseen gran movilidad) y por proyectiles balísticos.

Zona de bajo peligro (amarillo)

Para delimitar la zona de bajo peligro, se consideró el valor 0.22 para la relación H/L. Los valores de coeficiente H/L cercanos a 0.2 son frecuentes en los flujos piroclásticos tipo *blast*, originados por la explosión de un criptodomo o colapso de un domo en crecimiento, y/o flujos piroclásticos originados durante erupciones volcánicas violentas, tipo plinianas (IEV 4-5), como en los **Escenarios 3 y 5**, respectivamente. En el gráfico de Sigurdsson (2000), que relaciona la altura (H) versus distancia recorrida (L) para flujos piroclásticos, el valor de H/L para flujos piroclásticos se encuentra entre 0.2 y 0.5. Se escogió el valor de 0.22, debido a que este valor es típico de flujos piroclásticos que poseen alta movilidad. Para este escenario, los centros de emisión considerados fueron las cumbres de los volcanes Yucamane y Calientes.

En el caso de que los flujos piroclásticos sean originados por una erupción violenta del volcán Yucamane, las distancias hasta donde recorrerían dicho flujos se encontrarían entre 12 y 16 km, al pie de los flancos suroeste, sur y sureste de dicho volcán; asimismo, recorrerían menos de 10 km en el sector este del

Yucamane y menos de 3 km en el sector norte del Yucamane, debido a que limitan topográficamente con los volcanes López Estraña y Calientes, respectivamente.

En otro caso, si los flujos piroclásticos se originaran en el volcán Calientes, los límites de alcance estarían localizados entre 8 y 11 km al oeste, suroeste y este del volcán Calientes, y menos de 4 km al norte y sur de dicho volcán, esto debido a la presencia de los volcanes Yucamane (al sur) y Yucamane Chico (al norte) que actúan como “barreras” topográficas, pues impedirían el paso de los mencionados flujos piroclásticos.

Los alcances antes descritos coinciden con el alcance de flujo piroclástico de pómez y ceniza presentados por el Yucamane durante el Pleistoceno superior, que llegó alrededor de 8 km de distancia hacia el SO. Asimismo, coincide con la distancia alcanzada por el depósito de *blast* datado en $36\,450 \pm 250$ años AP, que aflora hasta 11 km de distancia al oeste del volcán Yucamane.

También varias erupciones plinianas con IEV 4-5 de volcanes del sur del Perú han recorrido distancias similares. Por ejemplo, los flujos piroclásticos de pómez y ceniza de la erupción del volcán Misti de hace 2050 años AP alcanzaron distancias de alrededor de 12 km del cráter del Misti (Thouret et al., 2001). Asimismo, según la literatura, los depósitos de lateral *blast* pueden recorrer decenas de kilómetros. Por ejemplo, el depósito de lateral *blast* del volcán Chachimbiro (Ecuador) ocurrido entre 3640 y 3510 años AP (Bernard et al., 2014) viajó a más de 10 km de distancia de dicho volcán.

En resumen, la zona de bajo peligro (amarillo) está localizada entre 3 y 16 km de distancia de los cráteres de los volcanes Yucamane y Calientes. Esta puede ser afectada por flujos piroclásticos generados durante erupciones plinianas (IEV 4-5) o por depósitos de *blast* durante erupciones laterales dirigidas. Según el registro histórico, la probabilidad de ocurrencia de este tipo de erupciones es muy baja.

6.3.2 Mapa de peligros por caídas piroclásticas

El mapa de peligros por caídas piroclásticas para el complejo volcánico Yucamane-Calientes se ha dividido en tres zonas.

Zonas de alto peligro en rojo, zonas de moderado peligro en naranja y zona de bajo peligro en amarillo. El foco de emisión sería el cráter de cualquiera de los volcanes, Yucamane o Calientes (Figura 6.4).

Según el estudio estratigráfico y geocronológico del complejo volcánico Yucamane-Calientes, el volcán con mayor posibilidad de presentar ese tipo de erupción es el volcán Yucamane.

Para la zonificación de peligros, se consideraron tres escenarios: erupciones vulcanianas con IEV 1-2, vulcanianas y subplinianas con IEV 3, y erupciones plinianas con IEV 4-5. En el volcán Yucamane se han encontrado depósitos piroclásticos asociados a erupciones subplinianas. Sin embargo, varios volcanes activos en el sur del Perú han tenido erupciones plinianas con IEV 4-5 durante el Holoceno (Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011; Rivera et al., 2014; Mariño & Thouret, 2003).

En la actualidad, se cuenta con un mapa de isópacas para los depósitos de caída subpliniana de pómez del volcán Yucamane de la erupción de hace 3270 años AP, pero además se tomaron mapas de isópacas de erupciones similares de otros volcanes.

También se tuvo en cuenta las direcciones predominantes de vientos, ya que estas controlan la dirección preferente de dispersión de las cenizas durante las erupciones. Para la zonificación de este tipo de peligro, se consideraron resultados del modelamiento de dispersión de ceniza efectuado con ayuda del programa FALL3D y datos de direcciones predominantes de vientos a 3000, 6000, 12000, 14000 m sobre la cima del volcán Yucamane, proporcionadas por SENAMHI.

Para el escenario vulcaniano con IEV 1-2, se utilizaron direcciones de vientos a 3000 y 6000 m sobre la cima del volcán Yucamane, y para escenarios vulcaniano y subpliniano (IEV 3), así como pliniano (IEV 4-5), se utilizaron velocidades y direcciones de vientos a 12000 y 14000 m s. n. m. Asimismo, se tuvo en cuenta las distancias alcanzadas por las cenizas en erupciones similares de otros volcanes del sur peruano como el Ubinas y el Misti.

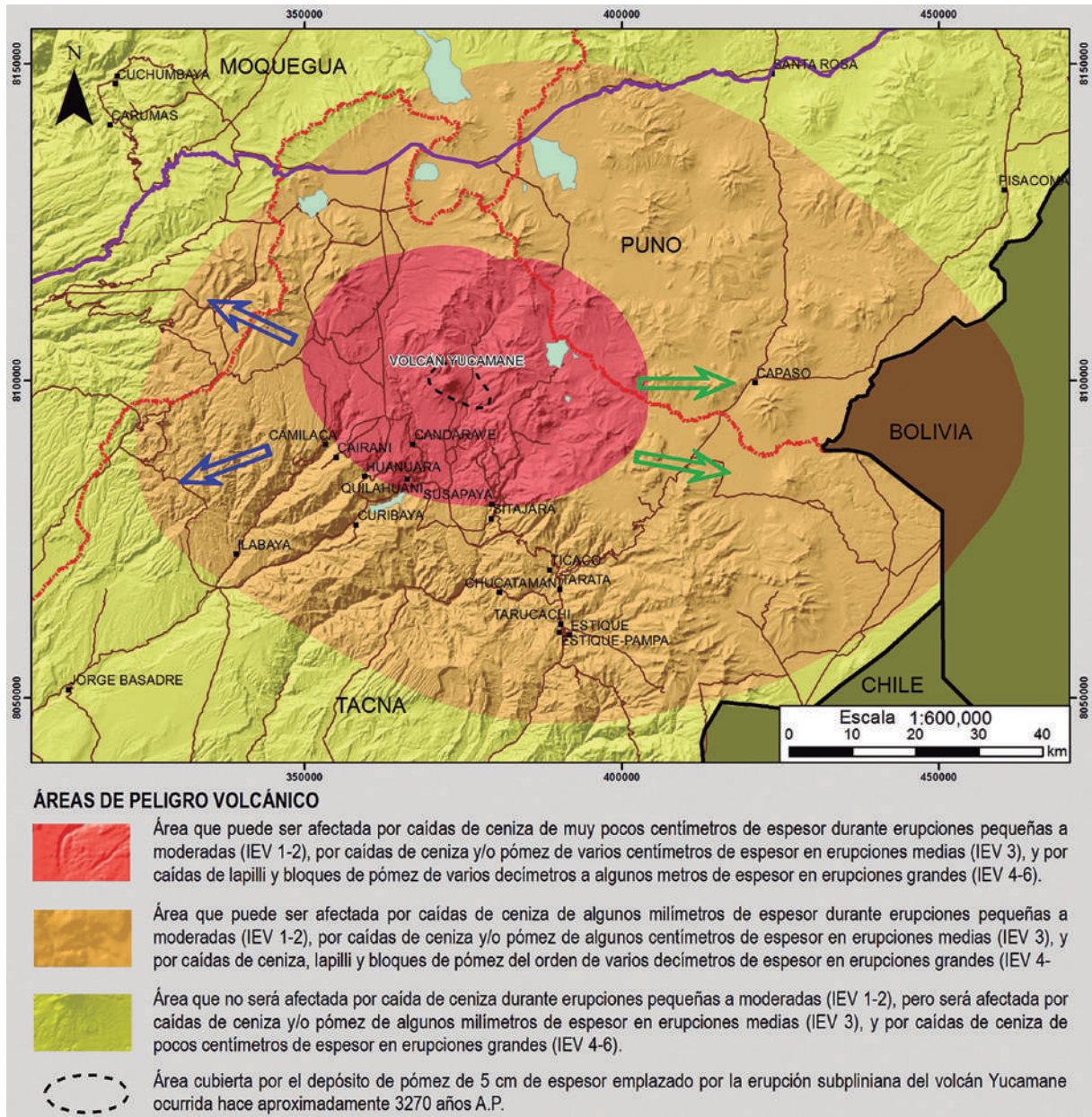


Figura 6.4 Mapa de peligros por caídas piroclásticas del complejo Yucamane-Calientes

Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro es el área proximal y se halla dentro de un radio de 20 y 30 km de distancia del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

Dependiendo del tipo de erupción de cualquiera de los volcanes, Yucamane o Calientes, esta área puede ser afectada de diversas maneras. En tal sentido, se presentan tres escenarios:

- a) Durante erupciones vulcanianas con IEV 2. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. Esta hipótesis está basada en la dispersión de cenizas de erupciones vulcanianas de los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti. En efecto, durante la erupción del volcán Sabancaya de 1987-1998 (IEV 2), a 8 km de distancia, se emplazaron caídas de ceniza de 1 cm de espesor hacia el este (Thouret et al., 1994). En la erupción

del volcán Ubina de los años 2013-2016 (IEV 2), a 6 km de distancia, se emplazaron caídas de ceniza de entre 0.5 y 1 cm de espesor. En la erupción vulcaniana del volcán Misti del siglo XV (IEV 2), a 10 km de distancia, se emplazaron caídas de ceniza de aproximadamente 4 cm de espesor (Suni, 1999; Thouret et al., 2001).

- b) En caso de erupciones vulcanianas o subplinianas con IEV 3. El área de alto peligro puede ser afectada por caídas de ceniza y lapilli pómez de varios centímetros de espesor. Esta hipótesis está basada en el mapa de isópacas de la erupción del volcán Nevado del Ruiz de 1985 (IEV 3, Naranjo et al., 1986); muestra que a 10 km de distancia de dicho volcán se emplazaron caídas de ceniza de 7 cm de espesor. También durante la erupción de hace 3270 años AP del volcán Yucamane, a 6 km de distancia se emplazaron caídas de ceniza de al menos 40 cm de espesor. En el caso del volcán Tungurahua (Ecuador), en la erupción de agosto 2006 de IEV 3, se reportaron espesores de caídas de ceniza de entre 4 y 5 cm, a 10 km de distancia del cráter (Eychenne et al., 2012)
- c) En caso de erupciones plinianas con IEV 4-5. El área de alto peligro puede ser afectada por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor. Se basa en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Misti de 2000 años AP (IEV 5), a 10 km de distancia, emplazó un depósito de caídas de lapilli de pómez de entre 30 y 40 cm de espesor (Suni, 1999; Thouret et al., 2001). La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de ceniza de alrededor de 3 m de espesor, a 10 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

En resumen, la zona de alto peligro está localizada hasta los 20 km (norte y sur del complejo volcánico) y 40 km (al este y oeste del complejo volcánico). Esta zona puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de varios centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor en erupciones violentas y voluminosas (IEV 4-5).

Zona de moderado peligro (naranja)

Los límites de la zona de moderado peligro por alcance de caída de tefras se halla aproximadamente a los 40 km al oeste, 80 km al este, y entre 40 y 50 al norte y sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes, respectivamente.

Dependiendo del tipo de erupción de cualquiera de los volcanes Yucamane o Calientes, esta área podría ser afectada de diversa

manera. En tal sentido, se presentan tres escenarios:

- a) Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor. Está basada en la dispersión de cenizas de la erupción vulcaniana del volcán Sabancaya de 1990-1998 (IEV 2), donde caídas de ceniza de 1 mm alcanzaron cerca de 30 km de distancia del cráter en dirección este (Thouret et al., 1994).
- b) Durante erupciones vulcanianas o subplinianas con IEV 3. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor. Se basa en el mapa de isópacas de las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz de noviembre 1985 y Tungurahua de agosto 2006 (IEV 3, Naranjo et al., 1986; Eychenne et al., 2012). En el caso del volcán Nevado del Ruiz, a 30 km de distancia emplazó caídas de ceniza de cerca de 2 cm de espesor; y en el caso del volcán Tungurahua se reportaron espesores de 0.7 a 0.8 cm a la misma distancia. Asimismo, está basada en la erupción subpliniana de hace 3270 años AP del volcán Yucamane, que a 20 km de distancia tiene menos de 1 cm de espesor.
- c) Durante erupciones plinianas con IEV 4-5. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez de varios centímetros a decímetros de espesor. Está basada en la dispersión de caídas piroclásticas de erupciones plinianas (IEV 4-5) de los volcanes Misti y Ticsani. La erupción del volcán Misti de 2050 años AP (IEV 5) emplazó caídas de lapilli de pómez de entre 4 y 5 cm de espesor (Suni, 1999; Thouret et al., 2001; Harpel et al., 2011) a 30 km de distancia. La erupción del volcán Ticsani de 11 000 años AP (IEV 4) emplazó caídas de ceniza de alrededor de 40 cm de espesor a 30 km del cráter (Mariño y Thouret, 2003).

En resumen, la zona de moderado peligro puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza de algunos centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez del orden de varios centímetros a decímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5).

Zona de bajo peligro (amarillo)

La zona de bajo peligro se halla a más de 40 km al norte, oeste y sur del complejo volcánico Yucamane-Calientes, y a más de 80 km de distancia en dirección este del complejo volcánico.

Durante erupciones vulcanianas con IEV 1-2, esta área sería mínimamente y temporalmente afectada por caídas de ceniza.

Durante erupciones vulcanianas o subplinianas con IEV 3. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor. Está basada en el mapa de isópacas de las erupciones de los volcanes Nevado del Ruiz de noviembre 1985 y Tungurahua de agosto 2006 (IEV 3, Naranjo et al., 1986; Eychenne et al., 2012). En efecto, el caso del volcán Nevado del Ruiz, a 50 km de distancia emplazó caídas de ceniza de entre 2 y 3 mm de espesor; mientras que en el caso del volcán Tungurahua se reportaron espesores de 6 mm a la misma distancia.

Durante erupciones plinianas con IEV 4-5. Esta área puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos centímetros o varios milímetros de espesor. Se basa, por ejemplo, en la erupción pliniana del volcán Hudson (Chile) del año 1991 que tuvo un IEV 4. Durante esta erupción se emplazaron cenizas de hasta 10 cm de espesor a 120 km al sureste de dicho volcán (Naranjo et al., 1993). Asimismo, está basada en la erupción pliniana del volcán Chaitén ocurrido en el año 2008 que tuvo un IEV 4. Esta erupción emitió cenizas que alcanzaron a medir 1 cm de espesor a 150 km al SE de dicho volcán (Watt et al., 2009). En nuestro medio, se basa en el volcán Ticsani de 11 000 años AP (IEV 4), que emplazó caídas de ceniza de alrededor de 1 cm de espesor a 50 km del cráter (Mariño & Thouret, 2003).

En resumen, la zona de bajo peligro sería muy poco afectada por caídas de ceniza durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), pero sí sería afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza de pocos centímetros o varios milímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-5).

6.3.3 Mapa de peligros por lahares y avalanchas de escombros

Para la zonificación de las áreas de inundación por flujos de lodo (lahares) del complejo Yucamane-Calientes, se utilizó el programa LAHARZ_py (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). Este programa correlaciona el volumen de un evento lahárico y el área planimétrica en sección transversal inundada por un lahar (Figura 6.2).

En el sur del Perú, se han realizado pocas estimaciones de volúmenes de lahares, solo se tienen cálculos para quebradas que descienden por los flancos del volcán Misti, además del río Chili que discurre entre los volcanes Misti y Chachani (Delaite et al., 2005). En dicho volcán, volúmenes máximos de lahares del orden de 1.5 a 4 millones de m³, son frecuentes, ocurren cada 300 a 1000 años, aproximadamente, y estarían asociados a erupciones explosivas moderadas (IEV 1-2).

Para el complejo Yucamane-Calientes, los volúmenes de los eventos laháricos escogidos fueron de 300 000 m³, 1 y 3 millones de m³. En las quebradas y ríos de interés se ubicaron las celdas de inicio, es decir, dentro de la zona proximal (cono de energía), mientras que el final de la distancia fue calculada por el programa LAHARZ_py.

Se escogió un volumen de 300 000 m³ para lahares de poco volumen y que estimamos son más frecuentes, y un volumen de 1 y 3 millones de m³, para lahares de importante volumen, y que son menos frecuentes.

Por otro lado, las imágenes de satélite muestran que el área de cobertura de hielo y nieve en época de invierno del complejo volcánico Yucamane-Calientes es de aproximadamente 0.2 km³. Si asumimos que durante una erupción subpliniana del volcán Yucamane o Calientes, se fundiera cerca del 10 % de hielo y nieve, como ocurrió durante la erupción del volcán Nevado del Ruiz del año 1985 (Naranjo, et al., 1986; Thouret, 1990; Thouret et al., 2007), en dicho complejo volcánico podrían generarse lahares con un volumen total de hasta 2 millones de m³. En tal sentido, se escogió un volumen máximo de 3 millones de m³, para los lahares de gran volumen o eventos extremos. La posibilidad de que ocurra este tipo de eventos es muy baja.

Debido a que las erupciones explosivas del complejo volcánico han emplazado depósitos piroclásticos en zonas proximales y distales, el modelamiento se realizó sobre las principales quebradas ubicadas en los flancos del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Se escogió la cabecera de cada quebrada, es decir, la zona proximal roja del mapa de peligros. El objetivo de esta etapa fue la delimitación de las zonas de inundación por lahares en las zonas distales.

En el mapa de peligros por lahares (ver mapa de peligros), la zona roja es considerada la zona de alto peligro (Figura 6.5) y corresponde a las áreas que pueden ser afectadas por lahares de hasta 300 000 m³; los lahares podrían asociarse a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2). La zona naranja, denominada de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de 1 millón de m³. La zona amarilla es considerada de bajo peligro y puede ser afectada por lahares de 3 millones de m³. Los lahares de 1 y 3 millones de m³ podrían estar asociados a erupciones explosivas de gran magnitud (IEV ≥ 3); cabe resaltar que la posibilidad de ocurrencia de tales erupciones es baja a muy baja.

En este mapa también se presenta el área que puede ser afectada por un colapso del volcán (línea morada), que se desencadena por el crecimiento de un domo al interior del volcán Yucamane.

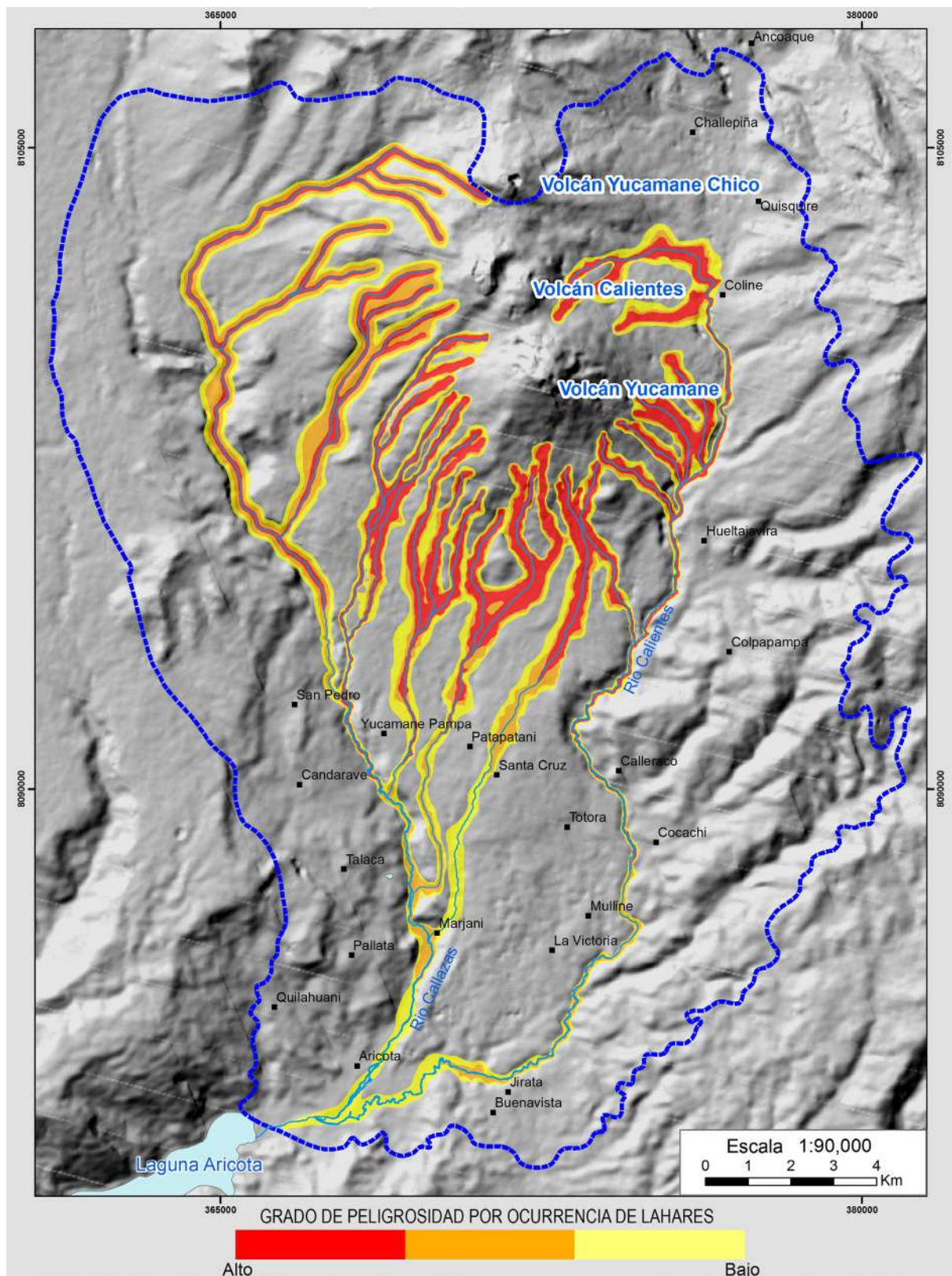


Figura 6.5 Mapa de peligros por lahares o flujos de lodo del complejo Yucamane-Calientes

Para delimitar el alcance de la avalancha de escombros, se utilizó el programa LAHARZ_py, que emplea el concepto de «cono de energía» (Malin & Sheridan, 1982), cuya metodología ha sido explicada en el acápite 6.3.1. Para ello, se consideró el valor 0.14 para la relación H/L. Según Siebert et al. (1987), los valores de 0.05 a 0.18 del coeficiente H/L son característicos de avalanchas de escombros.

Bajo estos parámetros, el límite de la avalancha de escombros alcanza su mayor distancia hacia el sector sur del Yucamane, donde recorre hasta 13 km. Hacia el oeste alcanza hasta los 9 km de distancia, mientras que al este y sureste alcanza los 7 km de distancia, aproximadamente. Al norte, recorre un promedio de 2 y 12 km de distancia respecto al volcán Yucamane.

CONCLUSIONES

- El complejo volcánico Yucamane-Calientes está conformado por dos volcanes alineados en dirección NNO-SSE, los cuales de norte a sur son el volcán Calientes y el volcán Yucamane. Estos a su vez yacen al sur de un volcán erosionado e inactivo denominado Yucamane Chico.
- El estratovolcán Calientes se ha construido en cinco etapas: “*Calientes I*”, durante el cual se emplazaron flujos de lavas andesíticas que yacen en la base del volcán; “*Calientes II*”, durante el cual se emplaza una secuencia ignimbrítica dacítica no soldada, de considerable volumen, que aflora al sur del complejo; “*Calientes III*”, constituido por flujos de lavas andesíticas y dacíticas que forman el cono inferior de dicho volcán —Una lava de esta etapa ha sido datada en 126 ± 3 ka—; “*Calientes IV*”, comprende la formación del cono superior del volcán, localizado entre los 4800 y 5350 m.s.n.m., y consiste en una intercalación de lavas andesíticas y dacíticas de pendiente bastante inclinada ($\geq 30^\circ$); y “*Calientes V*”, que comprende el emplazamiento de un complejo de domos dacíticos de aproximadamente 400 m de alto.
- De manera contemporánea a la última fase “*Calientes IV*”, se emplaza el volcán Yucamane, el cual se ha construido en tres periodos: “*Yucamane I*”, conformado por una secuencia de flujos de lavas andesíticas de aproximadamente 400 m de espesor que yace en la base del volcán; posteriormente colapsó parte de este cono, lo que generó depósitos de avalancha de escombros que se extienden a más de 12 km al SE y E del volcán Yucamane. “*Yucamane II*”, se produce el reiterado crecimiento de domos que luego colapsan y generan flujos piroclásticos de bloques y cenizas andesíticos y dacíticos, depositados en las quebradas de los flancos sur, SO y SE del Yucamane, a más de 9 km del cráter; uno de los primeros depósitos corresponde a un depósito de flujo piroclástico *blast* que fue datado en 36450 ± 250 ka. “*Yucamane III*”, se inicia con la formación del cono de la cumbre, entre los 3900 y 5495 m.s.n.m., ligado principalmente a una actividad efusiva que emite flujos de lava andesítica y dacítica; una lava de la base del estratocono superior fue datada en 23 ± 1 ka AP., mientras que una lava reciente fue datada en 3 ± 2 ka AP.
- Durante el Holoceno, el Yucamane presentó una actividad volcánica variada de tipo vulcaniana, subpliniana y pliniana, y emplazó flujos y caídas piroclásticas. Los depósitos emitidos durante la última erupción subpliniana corresponden a depósitos de caída y flujo piroclástico que fueron datados en aproximadamente 3270 años AP. Asimismo, poco antes presentó una erupción efusiva con emisión de flujos de lavas.
- Las rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes varían en composición desde andesitas básicas, andesitas y dacitas (53.9 a 66.9 wt.% SiO_2), y medianas a altamente potásicas (1.4 - 3.7 wt.% K_2O). Estas rocas pertenecen a la serie calcoalcalina.
- Las rocas del complejo Yucamane-Calientes presentan elevadas razones isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7064-0.7072) y bajos valores de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.512201-0.512367), que muestran que los magmas fueron contaminados por la corteza continental durante su evolución. Estos valores están dentro del campo de los magmas típicos de ZVC.
- En base al comportamiento de elementos mayores, trazas e isótopos, se atribuye que principalmente un proceso de asimilación y cristalización fraccionada (AFC) intervino en la diferenciación de la serie magmática del complejo Yucamane-Calientes; esto ocurre al interior de un reservorio magmático superficial.
- Considerando las características geoquímicas de las rocas del complejo volcánico Yucamane (bajos valores en HREE e Y) y el contexto geodinámico peruano, se asume que los magmas del complejo Yucamane-Calientes provendrían del manto. Estos habrían interactuado con magmas generados en la base de la corteza continental, donde está presente el anfíbol o granate, según modelo propuesto por Hildreth & Moorbath (1988) y Davidson et al. (1990).
- El estudio geológico y la distribución de los depósitos volcánicos muestran la presencia de cinco tipos principales de peligros volcánicos: por caídas de tefras, por emplazamiento de flujos piroclásticos, por lahares, por avalanchas de escombros y flujos de lava.
- Se han identificado cinco escenarios eruptivos en caso de una reactivación del volcán Yucamane, pues es el más

propenso a reactivarse por presentar actividad reciente. Los escenarios de mayor a menor posibilidad son los siguientes: erupción vulcaniana (IEV 1-2), erupción vulcaniana a subpliniana (IEV 3), crecimiento y colapso del domo, y avalancha de escombros; erupción efusiva con emisión de lavas; y erupción pliniana (IEV 4-5). En cualquiera de los casos, los productos emitidos pueden afectar los poblados, terrenos de cultivo y obras de infraestructura localizados en inmediaciones del volcán.

- En base a los estudios efectuados, se presentan tres mapas de peligro volcánico incluidos dentro de un solo formato. Estos mapas son: **mapa principal de peligros volcánicos múltiples** (por flujos de lava, flujos piroclásticos, proyectiles balísticos). Este mapa muestra una zona de alto peligro (rojo) que se encuentra entre 1 y 5 km de distancia del cráter del volcán Yucamane; la zona de moderado peligro (naranja), se encuentra entre 3 y 8 km de distancia del volcán; y la zona de bajo peligro (amarillo), está entre 3 y 16 km del complejo volcánico.
- En el **mapa de peligros por caídas piroclásticas**, la zona de alto peligro (rojo) se halla dentro de los 20 y 30 km de distancia del complejo volcánico; esta es la zona que puede ser afectada por erupciones leves (IEV 1-2), así como por erupciones muy explosivas. La zona de moderado peligro (naranja) se ubica entre 30 y 80 km de distancia; esta zona puede ser afectada en erupciones moderadas (IEV 3). La zona de bajo peligro (amarillo) se ubica entre 60 y 100 km de distancia; esta última zona puede ser afectada durante erupciones explosivas moderadas a muy violentas (IEV > 3).
- En el **mapa de peligros por lahares**, la zona roja, considerada de alto peligro, puede ser afectada por lahares de poco volumen (de hasta 300 000 m³); la zona naranja, de moderado peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 1 millón de m³; mientras que la zona amarilla, de bajo peligro, puede ser afectada por lahares de hasta 3 millones de m³. Por otro lado, el límite de alcance de una eventual avalancha de escombros está entre 9 y 13 km del volcán Yucamane.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio sedimentológico detallado -en cuanto a su distribución, volumen y edad de emplazamiento- de los productos emitidos durante erupciones holocénicas que corresponden a depósitos de caída de escorias y de lapilli de pómez que yacen al sur y sureste del volcán Yucamane.
- Realizar dataciones radiométricas K/Ar o Ar/Ar en lavas para precisar mejor la evolución magmática y dinámica del complejo volcánico Yucamane-Calientes.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J.; Heo, C.-H.; Valencia, M.; Ryoo, C.-R.; Santisteban, A., et al. (2012) - Características isotópicas y fuentes de mineralización de las franjas metalogenéticas del sureste peruano. En: Congreso Peruano de Geología, 16, Lima, 2012. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 5 p.
- Adams, N.K.; De Silva, S.L.; Self, S.; Salas, G., Schubring, S., et al. (2001) - The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 62 (8): 493-518.
- Alcalá, J. (2007) - La evolución de los glaciares en el complejo volcánico Ampato (Perú). Tesis Master, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 86 p.
- Alley, R.B. (2000) - The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5): 213-226.
- Benavides, V. (1999) - Orogenic evolution of the Peruvian Andes: the andean cycle. En: Skinner, B.J., ed. *Geology and ore deposits of the Central Andes*. Littleton, CO: Society of Economic Geologists, Special Publication 7, p. 61-107.
- Bernard, B.; Hidalgo, S.; Robin, C.; Beate, B. & Quijozaca, J. (2014) - The 3640-3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: a violent directed blast produced by a satellite dome. *Bulletin of Volcanology*, 76: 849, 20 p. Doi: 10.1007/s00445-014-0849-z
- Bignami, C.; Bosi, V.; Costantini, L.; Cristiani, C.; Lavigne, F. & Thierry, P., eds. (2012) - *Handbook for volcanic risk management: prevention, crisis management, resilience*. Orleans: MIAVITA team, 198 p.
- Blong, R.J. (1984) - *Volcanic hazards: A sourcebook on the effects of eruptions*. Sydney: Academic Press, 424 p.
- Blong, R.J. (2000) - Volcanic hazard and risk management. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R., Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of Volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 1215-1228.
- Brantley, S.R. & Myers, B. (1997) - Mount St. Helens - From 1980 to 1996. United States Geological Survey Fact Sheet 070-97, 2 p.
- Cas, R.A.F. & Wright, J.V. (1995) - *Volcanic successions: modern and ancient*. London: Chapman & Hall, 528 p.
- Clapperton, C.M. (1993) - *Quaternary geology and geomorphology of South America*. Amsterdam: Elsevier Science, 796 p.
- Cotrina, G.; Olarte, Y.; Peña, F.; Vargas, V.; Sánchez, M. & Pari, W. (2009) - Hidrogeología de la cuenca del río Locumba. INGEMMET, Boletín, Serie H: Hidrogeología, 2, 117 p.
- Davidson, J.P.; McMillan, N.J.; Moorbath S.; Wörner, G.; Harmon, R.S. & López, L. (1990) - The Nevados de Payachata volcanic region (18°S/69°W, N. Chile) II. Evidence for widespread crustal involvement in Andean magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 105(4): 412-432.
- Davidson, J.P.; Harmon, R.S. & Wörner, G. (1991) - The source of central Andean magmas; some considerations. En: Harmon, R.S. & Rapela, C.W., eds. *Andean magmatism and its tectonic setting*. Boulder, CO: Geological Society of America, Special Paper 265, p. 233-243.
- De La Cruz, N. & De La Cruz, O. (2000) - Mapa geológico del Cuadrángulo de Tarata, escala 1: 50,000. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 4 mapas
- De Silva, S.L. & Francis, P.W. (1991) - *Volcanoes of the Central Andes*. Berlin: Springer-Verlag, 216 p.
- De Silva, S.L.; Davidson, J.P.; Croudace, I.W. & Escobar A. (1993) - Volcanological and petrological evolution of volcan Tata Sabaya, SW Bolivia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 55(3-4): 305-335.
- Delacour, A.; Gerbe, M.-C.; Thouret, J.-C.; Wörner, G. & Paquereau, P. (2007) - Magma evolution of Quaternary

- minor volcanic centres in southern Peru, Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, 69(6): 581-608.
- Delaite, G.; Thouret, J.-C.; Sheridan, M.F.; Labazuy, P.; Stinton, A., et al. (2005) - Assessment of volcanic hazard of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphology N.F.*, supplement, 140: 209-231.
- Eychenne, J.; Le Pennec, J.-L.; Troncoso, L.; Gouhier, M. & Nedelec, J.-M. (2012) - Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 74(1): 187-205.
- Feeley, T.C. & Hacker, M.D. (1995) - Intracrustal derivation of Na-rich andesitic and dacitic magmas: an example from volcan Ollagüe, Andean Central Volcanic Zone. *Journal of Geology*, 103(2): 213-225.
- Fidel, L. & Huamani, A. (2001) - Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Yucamane. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 26, 158 p.
- Fisher, R.V. & Heiken, G. (1982) - Mt. Pelée, Martinique: May 8 and 20, 1902, pyroclastic flows and surges. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 13(3-4): 339-371.
- France, L.J. (1985) - Geochronology, stratigraphy, and petrochemistry of the Upper Tertiary volcanic arc, southernmost Peru, Central Andes. Master Thesis, Queen's University, Kingston, 182 p.
- Francis, P.W. (1993) - Volcanoes: a planetary perspective. New York: Oxford University Press, 443 p.
- Gerbe, M.-C. & Thouret, J.-C. (2004) - Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted during the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 66(6): 541-561.
- Hall, M.L.; Steele, A.L.; Mothes, P.A. & Ruiz, M.C. (2013) - Pyroclastic density currents (PDC) of the 16-17 August 2006 eruptions of Tungurahua volcano, Ecuador: Geophysical registry and characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 265: 78-93.
- Harpel, C.J.; De Silva, S.L. & Salas, G. (2011) - The 2 ka eruption of Misti volcano, southern Peru – the most recent plinian eruption of Arequipa's iconic volcano. Boulder, CO: Geological Society of America, 72 p. Special Paper, 484.
- Hildreth, W. & Moorbath, S. (1988) - Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(4): 455-489.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (1994) - Estudio geovolcanológico e inventario sistemático de manifestaciones geotermales del lote Tutupaca: hidrogeología, hidrogeoquímica y áreas de interés, informe inédito. Convenio INGEMMET-ELECTROPERU. Lima: INGEMMET, 325 p.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (1995) - Geología del Perú. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 55, 177 p.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2008) - Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de vivienda. Resultados definitivos a nivel provincial y distrital: Provincias Tacna, Candarave, Jorge Basadre y Tarata. Lima INEI, 4 t.
- Iverson, R.M.; Schilling, S.P. & Vallance, J.W. (1998) - Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8): 972-984.
- Jaén, H. (1965) - Geología del cuadrángulo de Tarata. Comisión Carta Geológica Nacional, 11, 91 p., 1 mapa
- Kelfoun, K.; Samaniego, P.; Palacios, P. & Barba, D. (2009) - Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well-constrained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 71(9): 1057-1075.
- Klinck, B.A.; Ellison, R.A. & Hawkins, M.P. (1986) - The geology of the Cordillera Occidental and Altiplano west of Lake Titicaca Southern Peru. Lima: British Geological Survey & Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 353 p.
- Kuno, H., (1968) - Differentiation of basalt magmas. En: Hess, H.H. & Poldervaart, A. eds. Basalts: the Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition. New York: Interscience Publishers, vol. 2, p. 623-688.
- Le Bas, M.J.; Le Maitre, R.W.; Streckeisen, A. & Zanettin, B. (1986) - A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750.
- Lowe, D.R.; Williams, S.N.; Leigh, H.; Connort, C.B.; Gemmill, J.B. & Stoiber R.E. (1986) - Lahars initiated by the

- 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. *Nature*, 324: 51-53.
- Major, J.J. & Newhall, C.G. (1989) - Snow and ice perturbation during historical volcanic eruptions and the formation of lahars and floods. *Bulletin of Volcanology*, 52(1): 1-27.
- Malin, M.C. & Sheridan, M.F. (1982) - Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560): 637-640.
- Mamani, M.; Wörner, G. & Sempere, T. (2010) - Geochemical variation in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *Geological Society of America Bulletin*, 122(1-2): 162-182.
- Mariño, J. & Thouret, J.C. (2003) - Geología, historia eruptiva y evaluación de peligros del volcán Ticsani (sur del Perú). *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (95): 7-31.
- Martin, H. (1986) - Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, 14(9): 753-756.
- Martin, H. (1987) - Archean and modern granitoids as indicators of changes in geodynamic processes. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(4): 360-365.
- Martínez, W. & Cervantes, J. (2003) - Rocas ígneas en el sur del Perú: Nuevos datos geocronométricos, geoquímicos y estructurales entre los paralelos 16° y 18°30' Latitud Sur. *INGEMMET, Boletín, Serie D: Estudios Regionales*, 26, 140 p.
- Mayle, F.E.; Burn, M.J.; Power, M. & Urrego, D.H. (2009) - Vegetation and fire at the Last Glacial Maximum in tropical South America. En: Vimeux, F.; Sylvestre, F. & Khodri, M., eds. *Past climate variability in South America and surrounding regions: from the Last Glacial Maximum to the Holocene*. Berlin: Springer, *Developments in Paleoenvironmental Research* 14, p. 89-112.
- Morche, W. & De la Cruz, N. (1994) - Geología y petrografía de los volcanes pleistocénicos Yucamane y Tutupaca (Tacna). En *Congreso Peruano de Geología*, 8, Lima, 1994. *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 209-213.
- Morrissey, M.M. & Mastin, L.G. (2000) - Vulcanian eruptions. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 463-475.
- Nakada, S. (2000) - Hazards from pyroclastic flows and surges. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 945-955.
- Naranjo, J.; Sigurdsson, H.; Carey, S.N. & Fritz, W. (1986) - Eruption of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, on 13 November 1985: tephra fall and lahars. *Science*, 233(4767): 961-963.
- Naranjo, J.; Moreno, H. & Banks, N.G. (1993) - La erupción del volcán Hudson en 1991 (46°S), Región XI, Aisén, Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín*, 44, 50 p.
- Norabuena, E.; Dixon, T.H.; Stein, S. & Harrison, C.G.A. (1999) - Decelerating Nazca-South America and Nazca-Pacific plate motions. *Geophysical Research Letters*, 26(22): 3405-3408.
- Peccerillo, A. & Taylor, S.R. (1976) - Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area. Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- Pierson, T.C.; Janda, R.J.; Thouret, J.-C. & Borrero, C.A. (1990) - Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 41(1-4): 17-66.
- Quang, C.X.; Clark, A.H.; Lee, J.K.W. & Hawkes, N. (2005) - Response of supergene processes to episodic Cenozoic uplift, pediment erosion, and ignimbrite eruption in the Porphyry Copper Province of southern Perú. *Economic Geology*, 100(1): 87-114.
- Rivera, M.; Thouret, J.-C. & Gourgaud, A. (1998) - Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (88): 53-71.
- Rivera, M.; Thouret, J.C.; Mariño, J.; Berolatti, R. & Fuentes, J. (2010) - Characteristics and management of the 2006-2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 198(1-2): 19-34.
- Rivera, M. (2010) - Genèse et évolution des magmas andésitiques à rhyodacitiques récents des volcans

- Misti et Ubinas (Sud du Pérou). Thèse Docteur, Université Blaise Pascal-Clermont Ferrand II, 407 p.
- Rivera, M.; Thouret, J.-C.; Samaniego, P. & Le Pennec, J.-L. (2014) - The 2006-2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 270: 122-141.
- Rivera, M.; Mariño, J.; Samaniego, P.; Delgado, R. & Manrique, N. (2016) – Geología y evaluación de peligros del Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 61, 122 p.
- Ryan, J.; Beck S.L.; Zandt, G.; Wagner, L.S.; Minaya, E. & Tavera, H. (2016) - Central Andean crustal structure from receiver function analysis. *Tectonophysics*, 682: 120-133.
- Samaniego, P.; Valderrama, P.; Mariño J.; Van Wyk de Vries, B.; Roche, O., et al. (2015) - The historical (218±14 aBP) explosive eruption of Tutupaca volcano (Southern Peru). *Bulletin of Volcanology*, 77: 51, 18 p. Doi: 10.1007/s00445-015-0937-8
- Sandeman, H.A.; Clark, A.H. & Farrar, E. (1995) - An integrated tectono-magmatic model for the evolution of the southern Peruvian Andes (13°-20°S) since 55 Ma. *International Geology Review*, 37(12): 1039-1073.
- Schilling, S.P. (1998) - LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. U.S. Geological Survey, Open File-Report 98-638, 79 p.
- Siebert, L.; Glicken, H. & Ui, T. (1987) - Volcanic hazards from Bezymianny- and Bandai-type eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 49(1): 435-459.
- Siebert, L.; Simkim, T. & Kimberley, P. (2011) - *Volcanoes of the World*. 3. ed. Washington, D.C.: Smithsonian Institution, Berkeley, CA: University of California Press, 551 p.
- Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R.; Rymer H. & Stix, J., eds. (2000) - *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, 1442 p.
- Smith, J.A.; Mark, B.G. & Rodbell, D.T. (2008) - The timing and magnitude of mountain glaciation in the tropical Andes. *Journal of Quaternary Science*, 23(6-7): 609-634.
- Strobach, C.A. (2009) – Corredor Turístico Andino “Tarata – Candarave” (en línea). Tacna: OGD Tur Tacna, 96 p. (consulta: diciembre 2016). Disponible en: <http://www.turismotacna.com/tarata_candarave_OGDURTACNA_turismotacna.pdf>
- Sun, S. & McDonough, W.F. (1989) - Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. En: Saunders, A.D. & Norry, M.J., eds. *Magmatism in the ocean basins*. London: Geological Society, Special Paper 42, p. 313-345.
- Tepley, F.J.; De Silva, S.L. & Salas, G. (2013) - Magma dynamics and petrological evolution leading to the VEI 5 2000 bp eruption of El Misti volcano, southern Peru. *Journal of Petrology*, 54(10): 2033-2065.
- Thouret, J.-C.; Guillaude, R.; Huamán, D.; Gourgaud, A.; Salas, G. & Chorowicz, J. (1994) - L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou): reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin Société Géologique de France*, 165(1): 49-63.
- 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*, 27(5): 435-438.
- Thouret, J.-C.; Finizola, A.; Fornari, M.; Legeley-Padovani, A.; Suni, J. & Frechen, M. (2001) - Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 113(12): 1593-1610.
- Thouret, J.-C.; Juvigne, E.; Mariño, J.; Moscol, M.; Loutsch, I., et al. (2002) - Late Pleistocene and Holocene tephrostratigraphy and chronology in southern Perú. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (93): 45-61.
- Thouret, J.-C.; Rivera, M.; Wörner, G.; Gerbe, M.C.; Finizola, A., et al. (2005) - Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 67(6): 557-589.
- Thouret, J.-C.; Ramírez, J.; Gibert-Malengreau, B.; Vargas, C.; Naranjo, J., et al. (2007) – Volcano-glacier interactions on composite cones and lahar generation: Nevado del Ruiz, Colombia, case study. *Annals of Glaciology*, 45(1): 115-127.
- Thouret, J.-C.; Jicha, B.R.; Paquette, J.L. & Cubukcu, E.H. (2016) - A 25 myr chronostratigraphy of ignimbrites in south Peru: implications for the volcanic history of the Central Andes. *Journal of the Geological Society*, 173(5): 734-756.

- Tilling, R.I., ed. (1993) - Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos, Santa Fé, Nuevo México, 2-3 julio 1989. [s.l.]: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 125 p.
- Tosdal, R.M.; Farrar, E. & Clark, A.H. (1981) - K-Ar geochronology of the late Cenozoic volcanic rocks of the Cordillera Occidental, southernmost Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 10(1-3): 157-173.
- Ui, T.; Takarada, S. & Yoshimoto, M. (2000) - Debris avalanches. En: Sigurdsson, H.; Houghton, B.F.; McNutt, S.R., Rymer, H. & Stix, J., eds. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego, CA: Academic Press, p. 617-626.
- Valdivia, J.G. (1956) - Las revoluciones de Arequipa (1874). Arequipa: Editorial El Deber.
- Vela, J. (2015) - Estudio tefro-estratigráfico de los depósitos asociados con las erupciones recientes del volcán Yucamane (Tacna). Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 114 p.
- Wasteneys, H.A.H.P. (1990) - Epithermal silver mineralization with a mid-Tertiary diatreme: Santa Bárbara, Santa Lucía district, Puno, Peru. PhD thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, 367 p.
- Watt, S.F.L.; Pyle, D.M.; Mather, T.A.; Martin, R.S. & Matthews, N.E. (2009) - Fallout and distribution of volcanic ash over Argentina following the May 2008 explosive eruption of Chaitén, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114 (B04207): 11 p. Doi: 10.1029/2008JB006219
- Wilson, M. (1989) - *Igneous petrogenesis. a global tectonic approach*. London: Unwin Hyman, 466 p.
- Winter, J.D. (2001) - *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 697 p.
- Wörner, G.; Uhlir, D.; Kohler, I. & Seyfried, H. (2002) - Evolution of the West Andean escarpment at 18°S (N. Chile) during the last 25 Ma: uplift, erosion and collapse through time. *Tectonophysics*, 345(1-4): 183-198. Doi: 10.1016/S0040-1951(01)00212-8.
- Zamacola y Jáuregui, J. (1888) - Apuntes para la historia de Arequipa (1804). Arequipa: Imp. de La Bolsa, 98 p.
- Zech, R.; Kull, Ch.; Kubik, P.W. & Viet, H. (2007) - Exposure dating of Late Glacial and pre-LGM moraines in the Cordon de Doña Rosa, Northern/Central Chile (~31°S). *Climate of the Past*, 3(1): 1-14.
- Zech, R.; Smith J. & Kaplan M.R. (2009) - Chronologies of the Last Glacial Maximum and its termination in the Andes (~10-55°S) based on surface exposure dating. En: Vimeux, F.; Sylvestre, F. & Khodri, M., eds. *Past climate variability in South America and surrounding regions: from the Last Glacial Maximum to the Holocene*. Berlin: Springer, *Developments in Paleoenvironmental Research* 14, p. 61-87.

RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES

Mapas

Mapa 1 Mapa geológico del Complejo Volcánico Yucamane-Calientes a escala 1:25 000.

Mapa 2 Mapa de peligros del Complejo Volcánico Yucamane-Calientes.

Figuras

Figura 1.1 (a) Mapa de localización de las zonas volcánicas de Sudamérica: norte (ZVN), central (ZVC), sur (ZVS) y austral (ZVA), modificado por Stern (2004). (b) Sector norte de la ZVC, en el sur del Perú. El volcán Yucamane está localizado en el extremo sur de la cadena volcánica plio-cuaternaria del sur peruano.

Figura 1.2 Mapa de ubicación del complejo volcánico Yucamane-Calientes. En la parte inferior, se presenta el mapa del sur peruano con la cadena volcánica y los volcanes activos y potencialmente activos existentes en dicha zona.

Figura 1.3 Precipitación mensual y total anual del año 1975 al 2006 registrada en la Estación de Candarave. Los meses de diciembre, enero, febrero y marzo registran mayor número de lluvias. Datos expresados en mm. Fuente: Senamhi.

Figura 1.4 Precipitación mensual y totales anuales del año 1980 al 2007 registrados en la Estación de Suches. Los meses de enero, febrero y marzo registran mayor número de lluvias. Datos expresados en mm. Fuente: Senamhi.

Figura 1.5 Precipitación mensual y totales anuales del año 1975 al 2007 registrados en la Estación Vizcachas. Los meses de enero, febrero y marzo presentan mayor número de lluvias. Datos expresados en mm. Fuente: Senamhi.

Figura 1.6 Mapa de ubicación de la cuenca Locumba

Figura 1.7 Mapa de rutas turísticas localizadas alrededor del complejo volcánico Yucamane-Calientes

Figura 1.8 Fuente termal de Calientes, ubicada al NE del complejo volcánico Yucamane-Caliente.

Figura 2.1 Mapa geomorfológico del complejo volcánico Yucamane-Calientes

Figura 2.2 Mapa de pendientes del complejo volcánico Yucamane-Calientes

Figura 2.3 Vista del sector sur del volcán Yucamane Chico. Nótese la pendiente empinada del sector sur del domo de lava, el cual corta lavas alteradas e hidrotermalizadas de color rojizo.

Figura 2.4 Vista del volcán Calientes. Nótese los domos de lava localizados al extremo SE de dicho volcán.

Figura 2.5 Vista del sector suroccidental del volcán Yucamane. Nótese la pendiente elevada del cono medio y superior del volcán.

Figura 2.6 Cráter reciente del volcán Yucamane en cuyo interior se distinguen escombros de talud.

Figura 2.7 Vista de la zona del depósito de avalancha, localizada al pie del flanco sur del volcán Yucamane.

Figura 2.8 Valle del río Salado relleno de sedimentos fluvio-aluviales en inmediaciones del sector de Pampa Cambaya (este del volcán Yucamane).

Figura 2.9 Morrenas que afloran al pie del flanco sur del volcán Yucamane.

Figura 2.10 Valle del río Salado en inmediaciones del sector de Calleraco, al sur del volcán Yucamane.

- Figura 2.11** Valle del río Callazas en inmediaciones del sector de Marjani. Nótese el amplio valle agrícola, localizado al sur del volcán Yucamane.
- Figura 2.12** Vista de la Pampa San Lorenzo, al oeste del volcán Yucamane.
- Figura 3.1** Imagen Aster 2006 en donde se han resaltado las estructuras tectónicas aledañas al complejo volcánico Yucamane-Calientes.
- Figura 3.2** Fallas normales de dirección NO-SE en el sector de Talaca, en la margen derecha del río Callazas. Los escarpes de fallas son semiverticales y tienen menos de 40 m de salto.
- Figura 3.3** Falla normal de dirección NO-SE al noreste de la localidad de San Pedro, margen derecha del río Callazas. Los escarpes de fallas son semiverticales y miden hasta 8 m de alto.
- Figura 3.4** Secuencia de areniscas cuarzosas de la Fm. Labra (Grupo Yura) en el sector Marjani.
- Figura 3.5** Secuencia de areniscas cuarzosas intercalada con niveles de lutitas pertenecientes a la Formación Labra (Grupo Yura), visible en la margen izquierda del río Callazas.
- Figura 3.6** Afloramiento de areniscas cuarzosas de la Fm. Hualhuani al pie del flanco suroeste del volcán Yucamane
- Figura 3.7** Secuencias ignimbríticas de la Fm. Huaylillas, visibles en la margen derecha del río Callazas, sectores Pallata y Talaca.
- Figura 3.8** Secuencia de flujos de pómez y ceniza soldados y consolidados, perteneciente a la Fm. Huaylillas que aflora al sur del poblado Calleraco (curso medio del río Salado).
- Figura 3.9** Vista del flanco oeste del volcán López Extraña. Este volcán es inactivo y erosionado, cuyas rocas presentan alto grado de alteración hidrotermal.
- Figura 3.10** Vista del flanco sur del volcán Nazaparco, localizado al noroeste del complejo volcánico Yucamane-Calientes. Este volcán es inactivo y se encuentra bastante erosionado.
- Figura 3.11** Vista del flanco este del volcán Yucamane Chico, en la cual se distinguen los productos de las diferentes etapas de evolución (Yu-1 al Yu-3).
- Figura 3.12** Columna litoestratigráfica generalizada e hipótesis de la evolución del complejo volcánico Yucamane-Calientes
- Figura 3.13** Depósito de flujo de pómez y ceniza de hace 540 ka que aflora en el sector de San Lorenzo, a 8.5 km al oeste del volcán Yucamane.
- Figura 3.14** Depósito de flujo de pómez y ceniza de hace 540 ka, facie lag breccia que aflora en el sector Curancurane, a 5 km al oeste del volcán Yucamane.
- Figura 3.15** Depósito de flujo de pómez y ceniza emplazado hace 540 ka, que aflora en inmediaciones del poblado de Yucamane Pampa, a 7.2 km al suroeste del complejo Yucamane-Calientes.
- Figura 3.16** Vista del flanco occidental del complejo volcánico Yucamane-Calientes donde se distinguen las lavas andesíticas y dacíticas del volcán Calientes y el domo Calientes.
- Figura 3.17** En medio de los volcanes Calientes y Yucamane, se distingue un complejo de domos dacíticos que aparentemente no fueron afectados por la actividad glacial del Pleistoceno-Holoceno.
- Figura 3.18** Vista del flanco suroeste del volcán Yucamane donde se distinguen las lavas emplazadas durante las etapas "Yucamane I" y el "Yucamane III".
- Figura 3.19** Vista de la secuencia de flujos de bloques y ceniza dacíticos visibles en la margen derecha del río Salado, a 7 km al SE del volcán Yucamane.
- Figura 3.20** Vista del depósito de blast y depósito de avalancha de escombros visible en la quebrada Curancurane.
- Figura 3.21** Vista del depósito de blast y el depósito de flujo de bloques y ceniza "Campanani" que la sobreyace. Esta secuencia aflora a 9 km al SO del cráter del volcán Yucamane, al suroeste poblado de Yucamane Pampa.
- Figura 3.22** Vista del área cubierta por el depósito de blast emplazado hace 36450 ± 250 años AP.

- Figura 3.23** Depósito de avalancha de escombros, de facies matriz y bloques soportados, de más de 60 m de espesor que se observa en la zona de Pampa Pajonal-Santa Cruz.
- Figura 3.24** Bloques andesíticos con fracturamiento tipo jigsaw o “dientes de serrucho”, observados dentro del depósito de avalancha de escombros, en la zona de Pampa Pajonal-Santa Cruz.
- Figura 3.25** Vista del depósito de blast, cubierto por los depósitos de flujo de bloques y ceniza “Campanani” y “Honda”. Esta secuencia aflora a 9 km al SO del volcán Yucamane, al sur del poblado de Yucamane Pampa.
- Figura 3.26** Depósito de flujo de bloques y ceniza “Campanani” de composición andesítica, no consolidado, que yace en el sector de Mal Paso, al pie del flanco sur del volcán Yucamane.
- Figura 3.27** Secuencia piroclástica en la quebrada Honda, a 9 km al sur del volcán, donde se distinguen depósitos de flujos de bloques y ceniza no consolidados, que yacen sobre la ignimbrita del volcán Calientes (depósito amarillento).
- Figura 3.28** Correlación estratigráfica en base a columnas estratigráficas levantadas al SO, S y SE del complejo Yucamane-Calientes.
- Figura 3.29** Depósito de flujo de escoria que aflora en la margen derecha de una quebrada sin nombre, a 7 km al suroeste del cráter del volcán Yucamane, sobre el cual yace una secuencia de lahares rico en pómez.
- Figura 3.30** Depósito de flujo de escoria visible en la margen izquierda de la quebrada Gentilcahua, a 7 km al suroeste del cráter del volcán Yucamane.
- Figura 3.31** Depósitos volcanoclásticos visibles en el sector de Mal Paso, a 7 km al sureste del cráter del volcán Yucamane.
- Figura 3.32** Depósito de caída de escoria “Halloween inferior” que aflora en el sector de Mal Paso, a 4 km al sur del cráter, donde mide 15 cm de espesor.
- Figura 3.33** Depósito de caída de escoria “Halloween inferior” y “Halloween superior” que aflora en el sector de Hueltajavira, a 6 km al sureste del cráter, donde mide 10 cm de espesor.
- Figura 3.34** Mapa de isópacas de la caída “Halloween inferior”
- Figura 3.35** Depósito de caída de escoria “Parda” que aflora en el sector de Mal Paso, a 4 km al sur del cráter, donde mide 16 cm de espesor.
- Figura 3.36** Mapa de isópacas de la caída de escoria “Parda”.
- Figura 3.37** Depósito de caída de escoria “Halloween superior” que aflora al pie del sector Mal Paso, a 4 km al sur del cráter, donde mide 12 cm de espesor.
- Figura 3.38** Correlación estratigráfica en base a columnas estratigráficas levantadas al E y SE del volcán Yucamane.
- Figura 3.39** Flujo de lava andesítica datada en 3 ± 2 ka, que yace a 4 km al sureste del volcán Yucamane.
- Figura 3.40** Depósito de caída de lapilli de pómez de hace 3270 ± 50 años AP, que aflora al pie del flanco este del volcán Yucamane.
- Figura 3.41** Vista del depósito de caída de lapilli de pómez de hace 3270 ± 50 años AP, que está cubriendo lavas andesíticas básicas de hace 3 ± 2 ka en el pie del flanco sureste del volcán Yucamane (sector Mal Paso).
- Figura 3.42** Mapa de isópacas de la caída de lapilli de pómez de hace 3270 ± 50 años y área cubierta por flujos de pómez asociados (tomado de Vela, 2015).
- Figura 3.43** Mapa de isopleas de pómez de la erupción de hace 3270 ± 50 años (tomado de Vela, 2015).
- Figura 3.44** Mapa de isopleas de líticos de la erupción de hace 3270 ± 50 años (tomado de Vela, 2015).
- Figura 3.45** Vista del depósito de flujo de pómez y ceniza de hace 3270 ± 50 años AP, que aflora al pie del flanco noreste del volcán Yucamane.
- Figura 4.1** Mapa de ubicación de muestras recolectadas en el complejo volcánico Yucamane-Calientes.

- Figura 4.2** Fotografías de secciones delgadas de andesitas del volcán Yucamane Chico. A) Muestra de lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y anfíbol, de textura porfírica. B) Muestra de lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno y anfíbol contenidos dentro de una pasta intersertal.
- Figura 4.3** Fotografía de una sección delgada de una dacita del volcán Yucamane Chico, en donde se distinguen cristales de biotita, plagioclasa y anfíbol dentro de una pasta vítrea.
- Figura 4.4** Fotografías de secciones delgadas de andesitas del volcán Calientes. A) Muestra de lava con cristales subhedrales de plagioclasa y ortopiroxeno. B) Muestra de lava con cristales de biotita, plagioclasa y anfíbol contenidos en una pasta microlítica. C) Muestra de lava con cristales de biotita, anfíbol y plagioclasa, de textura porfírica. D) Muestra de lava con cristales de biotita, anfíbol y plagioclasa incluidos dentro de una pasta vítrea.
- Figura 4.5** Fotografías de secciones delgadas de dacitas del volcán Calientes. A) Lava con cristales de plagioclasa, biotita y anfíbol, de textura porfírica. B) Lava con cristales de plagioclasa y clinopiroxeno incluidos dentro de una pasta de tipo intersertal. C) Muestra de domo con cristales de biotita, anfíbol, plagioclasa y óxidos de Fe-Ti, de textura porfírica. D) Lava con cristales de plagioclasa y anfíbol incluidos dentro de una pasta vítrea.
- Figura 4.6** Fotografías de secciones delgadas de andesitas básicas de la etapa "Yucamane III". A) Muestra de lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y anfíbol de textura porfírica. B) Muestra de lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno de textura porfírica.
- Figura 4.7** Fotografías de secciones delgadas de lavas andesíticas de textura porfírica. A) Lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y anfíbol. B) Lava con cristales de plagioclasa, olivino y óxidos de Fe-Ti. C) Lava con cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, anfíbol y biotita. D) Lava con cristales de plagioclasa y anfíbol que presentan una textura gabroica.
- Figura 4.8** Fotografías de secciones delgadas de bloques juveniles andesíticos. A) Muestra de bloque juvenil con cristales plagioclasa, anfíbol y ortopiroxeno, de textura porfírica. B) Muestra de bloque juvenil con cristales de plagioclasa, anfíbol, clinopiroxeno, de textura porfírica.
- Figura 4.9** Fotografías de secciones delgadas de bloques juveniles dacíticos. A) Muestra de bloque juvenil que contiene cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, incluidos dentro de una matriz vítrea. B) Muestra que contiene cristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, de textura porfírica.
- Figura 4.10** Fotografía de pómez dacíticas. A) Pómez con cristales de plagioclasa y anfíbol dentro de una pasta relativamente rica en microcristales y vesículas. B) Pómez con cristales de plagioclasa, biotita y anfíbol englobados dentro de una pasta vítrea.
- Figura 5.1** Diagrama de clasificación de rocas de las diferentes etapas volcánicas del complejo Yucamane-Calientes, "Total de alcalinos vs. sílice" (TAS), de Le Bas et al. (1986).
- Figura 5.2** Composición de las rocas del complejo Yucamane-Calientes con el diagrama AFM de Kuno (1968).
- Figura 5.3** Diagrama K_2O vs. SiO_2 de Pecerrillo & Taylor (1976) de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes que muestra tendencias moderada a fuertemente potásica.
- Figura 5.4** Diagramas de variación de elementos mayores versus el porcentaje en peso de sílice.
- Figura 5.5** Diagramas de variación de elementos traza versus el porcentaje en peso de sílice
- Figura 5.6** Diagramas multielementales de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes y volcán Yucamane Chico normalizados respecto al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989).
- Figura 5.7** Diagrama de tierras raras normalizada a la condrita (Sun & McDonough, 1989).
- Figura 5.8** Diagramas de ratios Dy/Yb, Sm/Yb, La/Yb y Sr/Y vs. SiO_2 de rocas del complejo Yucamane Calientes y volcán Yucamane Chico. (gr) granate, (pl) plagioclasa, (px) piroxenos, (amp) anfíbol.
- Figura 5.9** Diagramas de variación de composición isotópica de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes. a) Diagrama de $^{87}Sr/^{86}Sr$ vs. SiO_2 y b) $^{143}Nd/^{144}Nd$ vs. SiO_2 .

- Figura 5.10** Diagrama de composición isotópica de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de rocas del complejo volcánico Yucamane-Calientes, comparadas con los campos composicionales de la zona volcánica del sur (ZVS), centro (ZVC) y Andes del norte (ZVN) (Davidson et al., 1991). Todas las muestras del complejo Yucamane Calientes y el volcán Yucamane Chico caen en el campo de la ZVC.
- Figura 6.1** Tipos de peligros volcánicos que puede presentar un estratovolcán como el volcán Yucamane (Fuente USGS).
- Figura 6.2** Relaciones entre la distancia L y la altura H por donde recorrerán los lahares; así como las áreas en sección transversal (A) y planimétrica (B) inundadas por un evento lahárico (Schilling, 1998).
- Figura 6.3** Mapa proximal de peligros volcánicos múltiples del complejo Yucamane-Calientes
- Figura 6.4** Mapa de peligros por caídas piroclásticas del complejo Yucamane-Calientes
- Figura 6.5** Mapa de peligros por lahares o flujos de lodo del complejo Yucamane-Calientes

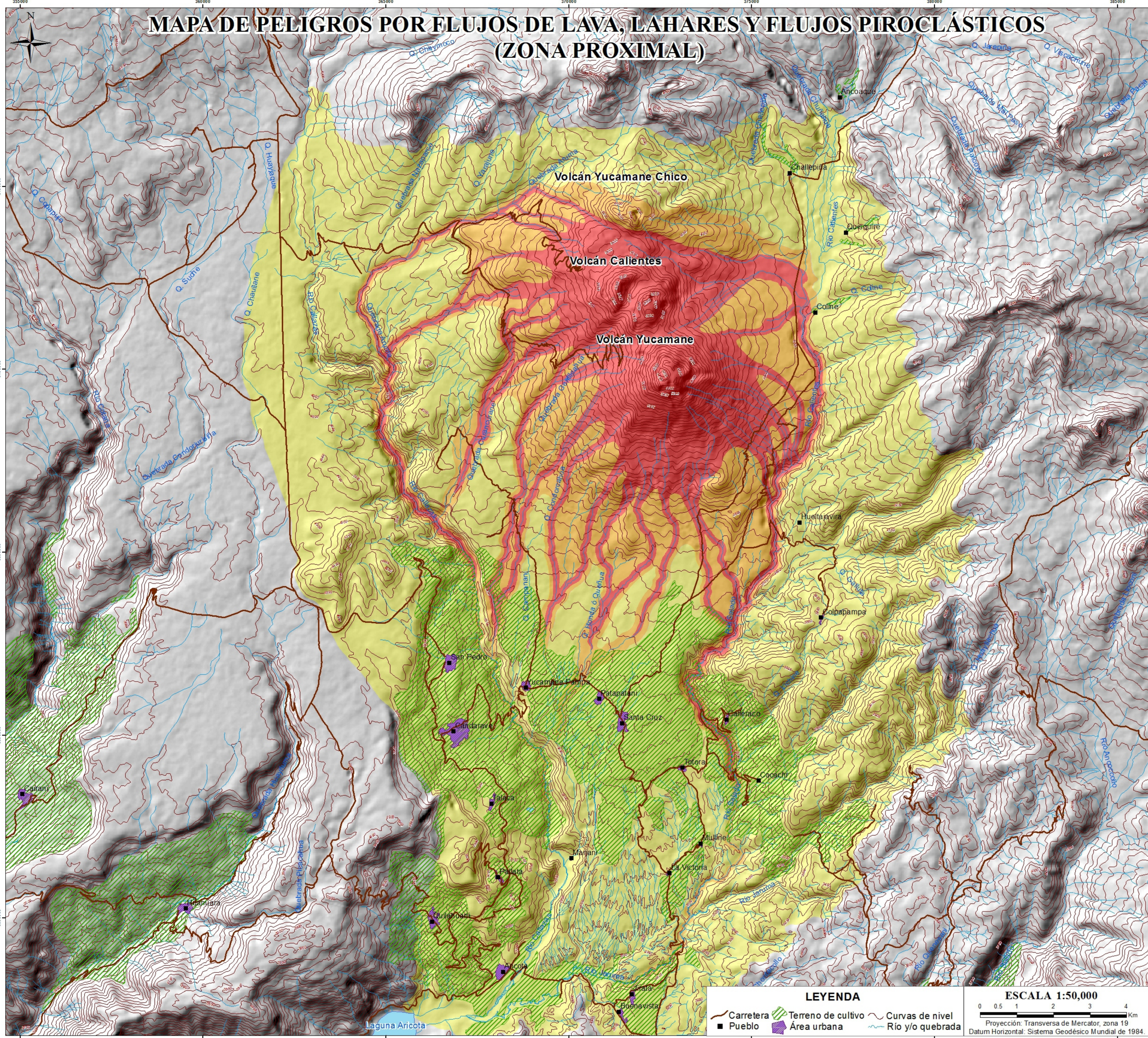
Tablas

- Tabla 1.1** Ubicación de estaciones pluviométricas en inmediaciones del complejo volcánico Yucamane-Calientes
- Tabla 1.2** Dirección promedio de vientos en la zona de Candarave a nivel de la troposfera y base de la estratosfera
- Tabla 1.3** Total de población censada en el 2007 y proyectada al 2015, provincia de Candarave
- Tabla 1.4** Total de población censada en el 2007 y proyectada al 2015, provincia de Tarata
- Tabla 1.5** Características de las viviendas ubicadas dentro del área de influencia del volcán Yucamane, de los distritos
- Tabla 1.6** Características de las viviendas ubicadas dentro del área de influencia del volcán Yucamane, de los distritos de la provincia de Tarata
- Tabla 4.1** Resumen de las características petrográficas del complejo volcánico Yucamane-Calientes
- Tabla 5.1** Resultados de análisis isotópicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de muestras efectuadas en el Servicio Geológico de Canadá Yuca-Chico: Yucamane Chico; Calientes; Yuca I: Yucamane I; Yuca II: Yucamane II; Yuca III: Yucamane III



Av. Canadá 1470 - San Borja, Lima 41, Perú
Teléfono: 051 - 1- 618 9800
Fax: 051-1-225-3063 | 051-1-225-4540
www.ingemmet.gob.pe
comunicacion@ingemmet.gob.pe

MAPA DE PELIGROS DEL COMPLEJO VOLCÁNICO YUCAMANE-CALIENTES



INTRODUCCIÓN

En este mapa se representan con distintos colores las zonas susceptibles a ser afectadas por los fenómenos volcánicos como son las lluvias de ceniza y piedra pómez, flujos de barro, flujos de lava y flujos piroclásticos. En el mapa principal (proximal), la determinación de las tres zonas de peligros está basada en una combinación o suma de todos los peligros potenciales que pueden afectar dichas áreas. Finalmente, los límites entre cada zona son graduales y no se pueden determinar con exactitud absoluta.

METODOLOGÍA

Para delimitar las zonas de peligro se tuvieron en cuenta estudios geológicos, modelamientos por computadora de flujos de barro (lahares) y flujos piroclásticos. Para ello se usó el programa LAHARZ. Además de ejemplos análogos de erupciones ocurridas en otros volcanes del sur del Perú.

TIPOS DE PELIGROS VOLCÁNICOS

CAÍDAS PIROCLÁSTICAS

Estas se generan cuando los fragmentos de roca son expulsados hacia la atmósfera violentamente, formando una columna eruptiva alta y que posteriormente caen sobre la superficie terrestre. Los fragmentos más grandes y densos caen cerca del volcán y se denominan bombas o bloques (>64 mm), mientras que las partículas de menor tamaño, denominadas lapilli (2-64 mm) y ceniza (<2 mm) son llevadas por el viento a varios kilómetros del volcán, luego caen y forman una capa de varios mm o cm de espesor. Estas partículas pueden causar problemas de salud en las personas, contaminar fuentes de agua, colapsar los techos por el peso acumulado, afectar cultivos, interrumpir el tráfico aéreo, entre otros.

FLUJOS DE BARRO (Huaycos ó Lahares)

Los flujos de barro son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizadas por el agua, que fluyen rápidamente, con velocidades promedio entre 10 y 20 m/s. Se generan durante periodos de erupción o de reposo volcánico. El agua puede provenir de fuertes lluvias, fusión de hielo o nieve. Normalmente destruyen todo a su paso y pueden alcanzar grandes distancias (>100 km).

FLUJOS Y OLEADAS PIROCLÁSTICAS

Los flujos piroclásticos son corrientes calientes (300°C a 800°C), conformadas por una mezcla de ceniza, fragmentos de roca y gases. Estos flujos descienden por los flancos del volcán a grandes velocidades, entre 100 y 300 m/s en promedio. Están constituidos por una parte inferior densa, que se desplaza por el fondo de las quebradas o valles, y otra superior, menos densa denominada oleada piroclástica, compuesta por una nube de gases y ceniza que con frecuencia salen del valle, pudiendo afectar un área mayor. Estos flujos y oleadas destruyen y calcinan todo lo que encuentran a su paso.

FLUJOS DE LAVA

Son corrientes de roca fundida expulsadas por el cráter o fracturas en los flancos del volcán. Pueden fluir por el fondo de las quebradas y alcanzar varios kilómetros de distancia, pero en nuestros volcanes, cuyo magma es viscoso, normalmente se enfrían en la zona del cráter, formando domos de lava, o recorren escasos kilómetros de diámetro. Los flujos de lava destruyen y calcinan todo a su paso, sin embargo, no representan una amenaza elevada para las personas debido a su baja velocidad.

AVALANCHAS DE ESCOMBROS

Las avalanchas de escombros son deslizamientos rápidos del flanco de un volcán. Son causadas por varios factores: presencia de fracturas que producen la inestabilidad del volcán, pendientes elevadas de las laderas del volcán, presencia de fallas, sismos fuertes, alteración hidrotermal y/o explosiones volcánicas violentas. Las avalanchas de escombros bajan a gran velocidad y destruyen todo lo que se encuentra a su paso.

GASES VOLCÁNICOS

En etapas pre-eruptivas y eruptivas se produce una importante liberación de gases, principalmente vapor de agua; pero también dióxido de carbono, dióxido de azufre, ácido clorhídrico, monóxido de carbono, ácido fluorhídrico, azufre, fluor, etc. Estos gases se diluyen y dispersan rápidamente, sin embargo pueden alcanzar altas concentraciones en el cráter o laderas de la cumbre, donde pueden generar intoxicación y muerte de personas y animales. Los gases también pueden condensarse y adherirse a partículas de ceniza, así como reaccionar con las gotas de agua y provocar lluvias ácidas que generan corrosión, daños en los cultivos y contaminación de aguas y suelos.

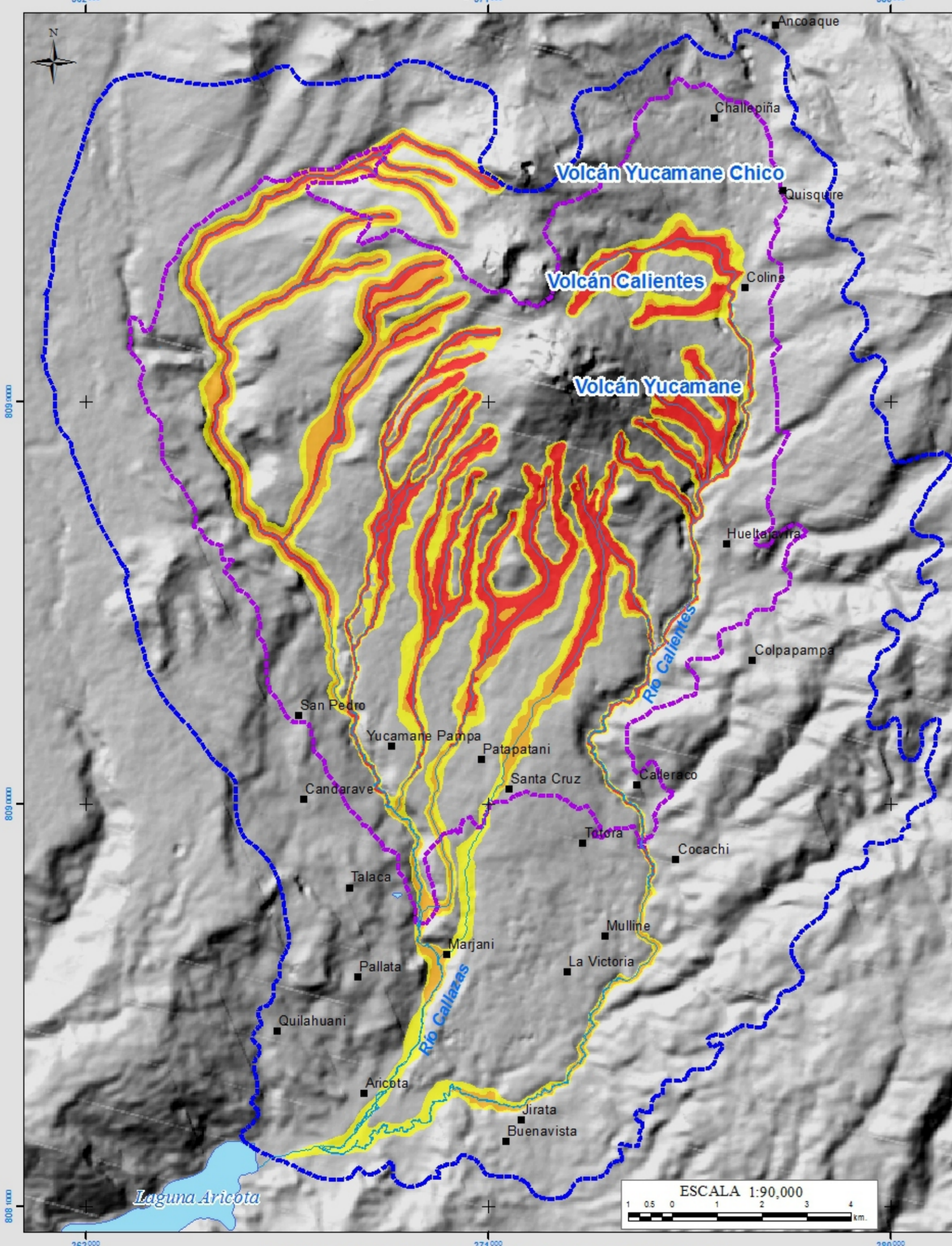
IEV-Índice de Explosividad Volcánica: Representa la magnitud de una erupción volcánica, que va en una escala de 0 a 8. El IEV se define en función del volumen del material expulsado, la altura de la columna eruptiva y duración de la erupción.

Zona de alto peligro: Puede ser severamente afectada por flujos de lava, flujos piroclásticos pequeños, lahares y proyectiles balísticos, generados en erupciones explosivas leves (IEV 1 - 2), más aún en erupciones moderadas a grandes. Debido a su cercanía al volcán y sus características geomorfológicas, es la zona de mayor peligro.

Zona de moderado peligro: Puede ser afectada por flujos de lava, así como por flujos piroclásticos y lahares, durante erupciones explosivas moderadas (IEV 3 - 4). Con mayor razón también puede ser afectada durante erupciones grandes.

Zona de bajo peligro: Puede ser afectada por flujos piroclásticos de pómez y ceniza, así como lahares, pero sólo en erupciones de magnitud muy grande (IEV 5 - 6). Es la zona más alejada del complejo volcánico y por tanto la de menor peligro.

MAPA DE PELIGROS POR FLUJOS DE BARRO (LAHARES), EXPLOSIÓN LATERAL DIRIGIDA (BLAST) Y AVALANCHA DE ESCOMBROS



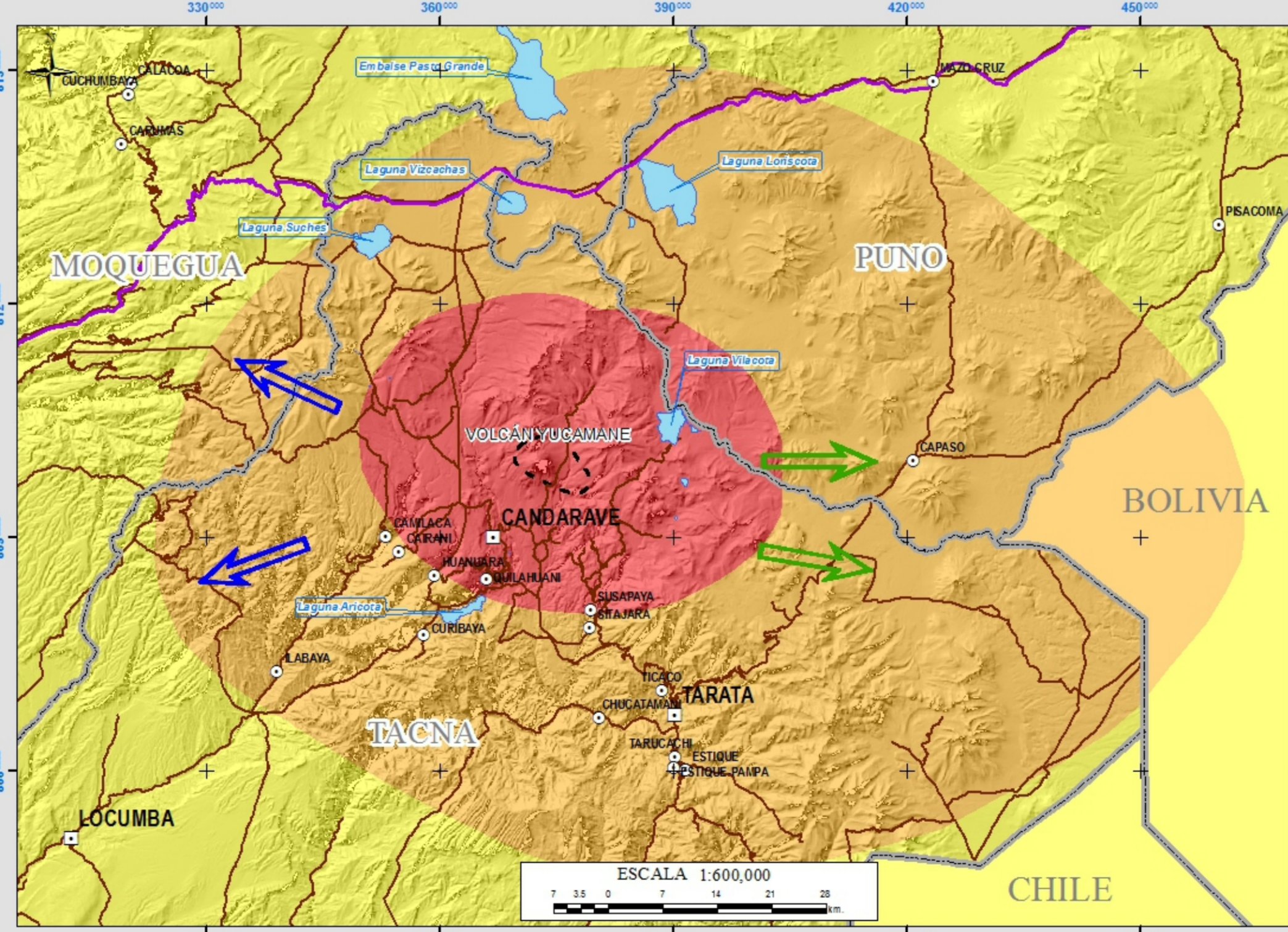
GRADO DE PELIGROSIDAD POR OCURRENCIA DE LAHARES

Alto (rojo) a Bajo (amarillo)

La zona de alto peligro (rojo) puede ser afectada por lahares de poco volumen (300000 m³), la posibilidad de ocurrencia es alta. La zona de moderado peligro (naranja) puede ser afectada por lahares de gran volumen (1 millón de m³), la posibilidad de ocurrencia es baja. La zona de bajo peligro (amarillo) puede ser afectada por lahares de gran volumen (>3 millones de m³), pero la posibilidad de ocurrencia es muy baja.

— Límite del área que puede ser afectada por un depósito de una explosión lateral dirigida (blast).
— Límite del área que podría ser afectada por una avalancha de escombros, originada por un eventual colapso de flanco del volcán Yucamane.

MAPA DE PELIGROS POR CAÍDA DE CENIZA, ESCORIA Y PÓMEZ

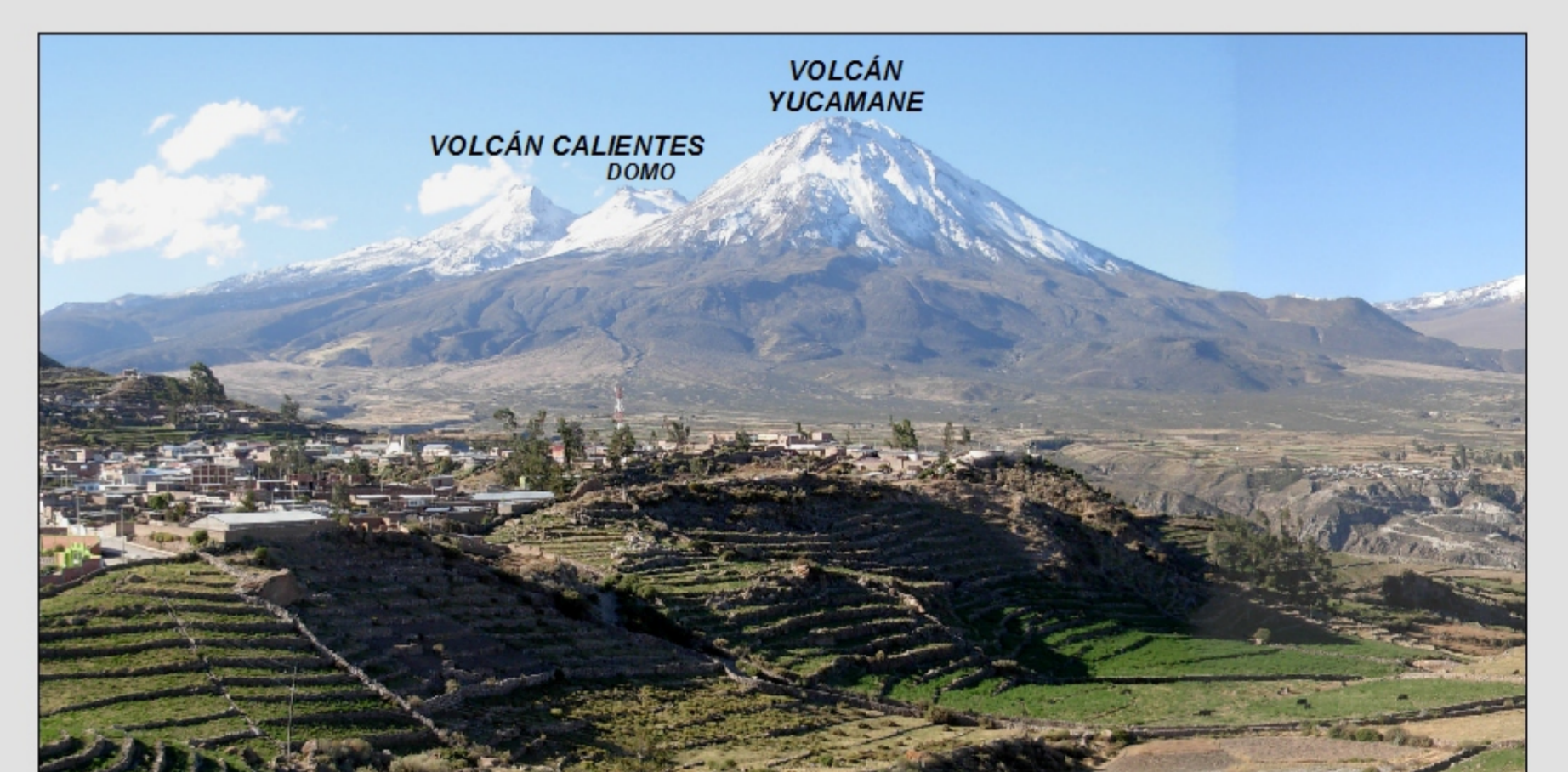


ÁREAS DE PELIGRO VOLCÁNICO

- Área que puede ser afectada por caídas de ceniza de muy pocos centímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza y/o pómez de espesor de varios centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de lapilli y bloques de pómez de varios decímetros a algunos metros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-6).
- Área que puede ser afectada por caídas de ceniza de algunos milímetros de espesor durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), por caídas de ceniza y/o pómez de algunos centímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza, lapilli y bloques de pómez del orden de varios decímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-6).
- Área que no será afectada por caída de ceniza durante erupciones pequeñas a moderadas (IEV 1-2), pero será afectada por caídas de ceniza y/o pómez de algunos milímetros de espesor en erupciones medias (IEV 3), y por caídas de ceniza de pocos centímetros de espesor en erupciones grandes (IEV 4-6).
- Área cubierta por el depósito de pómez de 5 cm de espesor emplazado por la erupción subpliniana del volcán Yucamane ocurrida hace aproximadamente 3270 años A.P.

LEYENDA

- Carretera binacional Ilo - Desaguadero
- Límite internacional
- Límite regional
- Vía de acceso
- Dirección de viento predominante entre los meses de abril a septiembre (entre 6000-9000 m sobre la cima del volcán)
- Ligera tendencia de vientos entre los meses de octubre a marzo (entre 6000-9000 m sobre la cima del volcán)
- Capital provincial
- Capital distrital



Vista del poblado de Candarave, localizado a 11 km al NE del complejo volcánico Yucamane - Calientes



REFERENCIAS

- Fidel, L., Huamani, A. (2001). Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Yucamane. Boletín N°28, Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica, INGEMMET, 114p.
- Rivera, M. & Mariño, J. (2004). Volcán Yucamane (Sur del Perú). Geología, petrología y evaluación preliminar de las amenazas volcánicas. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 98, 27p.
- Rivera, M., Samaniego, P., Llorza, C., Guillou, H., Vela, J. (2014). Geología y evolución del complejo volcánico Yucamane - Calientes. Resumen XVII Congreso Peruano de Geología, Lima - Perú.
- Schilling, S. (1998). LAHARZ. GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. US Geological Survey Open - File Report 98-638, 78 pp.
- Vela, J. (2015). Estudio tafrostratigráfico de los depósitos asociados con las erupciones recientes del volcán Yucamane. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, 118p. Vela, J. (2015).

AUTORES

Marco Rivera¹, Pablo Samaniego², Jessica Vela^{1,3}, Gerardo Jacome⁴

¹Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)

²Instituto de Investigación Para el Desarrollo de Francia (IRD)

³Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA)

⁴Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)